



# Formalisme et interprétation physique chez Schrödinger.

Michel Paty

## ► To cite this version:

Michel Paty. Formalisme et interprétation physique chez Schrödinger.. Bitbol, Michel et Darrigol, Olivier. Erwin Schrödinger. Philosophy and the birth of quantum mechanics. Philosophie et naissance de la mécanique quantique., Editions Frontières, p.161-190, 1993. halshs-00167126

**HAL Id: halshs-00167126**

**<https://shs.hal.science/halshs-00167126>**

Submitted on 14 Aug 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

in Bitbol, Michel et Darrigol, Olivier (eds.), *Erwin Schrödinger. Philosophy and the birth of quantum mechanics. Philosophie et naissance de la mécanique quantique*, Editions Frontières, Paris, 1993, p. 161-190.

# Formalisme et interprétation physique chez Schrödinger\*

Michel Paty\*\*

**RESUME.-** La question du rapport entre le formalisme et l'interprétation physique se pose non seulement au moment des réorganisations d'un système théorique et conceptuel, mais dans le travail d'élaboration théorique lui-même. C'est sous ce double aspect que nous examinons les travaux et la pensée de Schrödinger relativement à la physique quantique. Son travail sur le formalisme mathématique est constamment sous-tendu par une pensée proprement physique qui prend la forme d'une intuition ondulatoire, garante pour lui de l'intelligibilité. Quant à sa pensée de l'interprétation de la mécanique quantique, elle reste marquée, à travers son évolution, par une 'image ondulatoire du monde'. On étudie également la manière dont il aborde la structure de l'espace-temps de la Relativité générale, favorisant la possibilité d'une interprétation directe des grandeurs géométriques spatio-temporelles.

**ABSTRACT.-** *Formalism and physical interpretation in Schrödinger.-* The question of the relation between a formalism and its physical interpretation arises not only when theoretical and conceptual systems are reorganized, but in the theoretical elaboration as well. We examine Schrödinger's work and thought with this double concern. His work on the mathematical formalism is constantly sustained by a proper physical thought which takes the form of a wave intuition that guarantees him intelligibility. Concerning his interpretation of quantum mechanics, his thought remains characterized, through its evolution, by a 'wave image of the world'. We study also the way he deals with space-time structure in General relativity and favours

---

\* Exposé au Colloque *Erwin Schrödinger: philosophy and the birth of quantum mechanics*, Paris 18-20 juin 1992.

\*\* Equipe REHSEIS (UPR 318) du CNRS et Université Denis Diderot-Paris 7, 2 place Jussieu, 75251 Paris-Cedex 05.

the possibility of a direct interpretation of space-time geometrical quantities.

## 1. INTRODUCTION: LE PROBLEME DU FORMALISME ET DE L'INTERPRETATION

On a souvent tendance à privilégier, dans les discussions sur les problèmes d'interprétation en physique, les termes de la situation tels qu'ils se présentent après que le paysage théorique a été bouleversé par l'avènement de la théorie formalisée. L'espace-temps de Minkowski de la Relativité restreinte, la question de la géométrie dans son rapport à l'espace physique avec la Relativité générale, enfin la 'fonction  $\psi$ ' et le formalisme de la mécanique quantique, ont suscité des débats dans lesquels le formalisme théorique est considéré sous sa forme désormais acquise, posé devant nous comme une énigme à déchiffrer, ou du moins comme un symbolisme mathématique qu'il convient d'interpréter, c'est-à-dire de mettre de manière adéquate en relation avec la description des phénomènes physiques, voire de juxtaposer directement aux données empiriques. Cette manière reçue d'aborder le problème de la signification des propositions formelles d'une 'science empirique' n'est qu'en partie légitime, si les contenus des concepts ainsi formalisés ne peuvent être totalement réinventés à partir d'une pure forme. Les élaborations et les constructions dont ils ont été l'objet avant les réorganisations actuelles ont contribué à façonner ces contenus, et l'approche historique n'est pas étrangère non plus aux questions posés par l'interprétation<sup>1</sup>.

La conception statique qui cantonne la question de l'interprétation à la juxtaposition d'un schème formel et d'un donné empirique justifierait assez cette remarque du physicien Alfred Landé, pour qui la dispute sur la signification de la fonction  $\psi$  ressemble aux débats scolastiques dans lesquels au lieu que les mots représentent les choses, c'étaient les choses qui représentaient les mots. En mécanique quantique, l'on discute, remarque-t-il, "de diverses interprétations des formules mathématiques comportant des symboles énigmatiques et aboutissant à des images et des constructions mentales", alors qu'il faudrait "partir d'axiomes ou postulats physiques du genre de ceux de la théorie de la Relativité (par ex., symétrie, invariance), dont les conséquences physiques seraient en accord avec les phénomènes et s'exprimeraient par le formalisme actuel de la théorie quantique"<sup>2</sup>.

C'est précisément le modèle de la théorie de la Relativité qu'invoquait Heisenberg, en 1955, à propos, cette fois, de l'élaboration, et de sa propre voie vers la mécanique quantique. Parlant de l'introduction mathématique de vecteurs d'état d'un espace de Hilbert pour représenter *physiquement* l'état d'un système, Heisenberg indique que "le prototype de cette méthode de solution se trouve dans la théorie de la Relativité restreinte d'Einstein", lorsque ce dernier interpréta le

---

<sup>1</sup> Elle porte avec elle l'enjeu de la question de la rationalité dans le travail d'élaboration scientifique en dépit de, ou plutôt dans, la diversité des styles selon les auteurs, et de la légitimité pour la philosophie de la connaissance de s'interroger sur le processus même de création scientifique. Voir Paty 1992a, 1993a.

<sup>2</sup> Landé 1950, p. xv.

temps "apparent" de la transformation de Lorentz (le "temps local") comme étant le temps réel, résolvant ainsi les difficultés de l'électrodynamique<sup>3</sup>. Mais cette assertion, faite à propos de l'élaboration d'une théorie formalisée, la mécanique quantique, par son auteur lui-même, concerne, pour ce qui est du modèle invoqué - la Relativité -, le point de vue de la théorie acquise et réorganisée. Car elle porte sur une conception "reconstruite" de la théorie de la Relativité, sur une synthèse de l'électrodynamique relativiste de Lorentz et de la théorie de la covariance (restreinte) d'Einstein<sup>4</sup>, non sur la démarche effective de ce dernier. Le travail d'Einstein n'a pas consisté à ré-interpréter les formules de transformation de coordonnées et le temps local de Lorentz, mais à reconstruire le concept de temps (en se basant, certes, sur une ré-interprétation du paramètre temps, mais beaucoup plus générale que celle indiquée par Heisenberg), puis à déduire les formules de transformation, retrouvant par là le temps local.

Les remarques de Landé et de Heisenberg à propos de la mécanique quantique nous incitent à considérer la question de l'interprétation du formalisme aux deux niveaux de l'élaboration et de la réorganisation de la théorie. La pensée et le travail de Schrödinger sont concernés de façon éminente par ces deux aspects. Quant au second, on sait combien, dans son cas comme pour les autres fondateurs de la physique quantique, l'interprétation du formalisme touche aux conceptions non seulement physiques, mais aussi épistémologiques, philosophiques et même métaphysiques: je tenterai de montrer - sommairement - de quelle manière. Mais les débats, désormais classiques, sur l'interprétation de la mécanique quantique et de la fonction  $\psi$  ne sauraient nous faire oublier l'autre aspect de la question de l'interprétation, tel qu'il se présente dans le travail d'élaboration qui aboutit à poser le formalisme dont on parle. C'est par là que je commencerai.

## 2. L'ENTRAÎNEMENT MUTUEL DE LA PENSÉE PHYSIQUE ET DU FORMALISME: LA CONSTRUCTION DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE

### 2.1. *Scenario*

Le jeu, dans la construction théorique, du formalisme et de l'interprétation physique, dans le cas de Schrödinger comme dans celui d'autres physiciens théoriciens de la période contemporaine, peut être résumé de manière lapidaire par la formule suivante: pensée physique, d'où formalisme comme outil, et puissance du formalisme, qui entraîne la pensée physique. La question se pose alors de

---

<sup>3</sup> Heisenberg 1955, p. 15.

<sup>4</sup> Sur ces qualifications des travaux respectifs de Lorentz et d'Einstein en 1904 et 1905, voir Paty 1993a.

savoir ce qu'il faut faire des résultats formels obtenus. Ou, en d'autres termes: dans quel sens faut-il entendre la remarque d'Einstein suivant laquelle "c'est dans la mathématique que se trouve le principe créateur"<sup>5</sup>? Avec la physique formalisée de la Relativité générale ou des théories du champ unifié, comme avec la mécanique quantique et les théories quantiques du champ et des symétries, la pensée physique se trouve de fait bien souvent entraînée 'en avant', c'est-à-dire à formuler des propositions (de portée physique) résultant du jeu du formalisme, mais dont le sens physique n'est pas donné d'emblée. Nous n'examinerons pas ici la question de savoir s'il en fut ainsi également d'une manière générale depuis que la physique est une science mathématisée. Nous nous contenterons de remarquer que la mathématisation de la physique ne s'est jamais effectuée d'une manière universelle, et que la nature et les circonstances de la relation entre la physique et le formalisme mathématique sont marquées par l'époque (par un certain 'système des mathématiques et de la physique'<sup>6</sup>) et par les 'styles' particuliers de recherche. Le travail et la pensée de Schrödinger lui-même reflètent ce problème.

Il est utile d'indiquer tout d'abord la trame ou le scénario d'ensemble, relativement aux étapes du développement de la mécanique quantique, par lesquels se manifestent sous des modalités diverses le jeu d'entraînement de la pensée physique et du formalisme, avant de revenir sur quelques aspects concernant la pensée et le travail de Schrödinger. Nous prolongerons ensuite ces considérations par l'examen de sa conception dans un tout autre domaine, celui de la Relativité générale et du champ continu.

Le premier temps du scénario correspond à la construction de la mécanique ondulatoire et de la mécanique quantique, et illustre la diversité des styles de recherche et des modes de penser la relation entre le formalisme et l'interprétation. Dans les approches de la physique quantique de Bohr, Schrödinger, de Broglie, Einstein, aussi différentes soient-elles, la pensée physique des problèmes précède l'expression des relations formelles (pensée physique, d'où formalisme). On doit à Einstein d'avoir établi, sur une base expérimentale et théorique, la dualité onde-corpuscule, par ses travaux sur le rayonnement et sur la constitution atomique des corps, légitimée par les relations ( $E = h \nu$ ,  $p = h / \lambda$ ), dont la seconde a été obtenue en fin de parcours<sup>7</sup>. Pour y parvenir, il a suivi le fil d'une recherche préoccupée d'établir les relations auxquelles devra obéir une théorie fondamentale des phénomènes quantiques. Admettant ces relations comme acquises, de Broglie et Schrödinger développent, chacun de son côté, une représentation 'intuitive' de la dualité qu'elles expriment. Dans le cas de de Broglie, leur généralisation à tous les éléments de matière, tout en étant proposée par l'intermédiaire de raisons formelles (la formulation conjointe des principes de Fermat et de Maupertuis et leur réconciliation dans le

---

<sup>5</sup> Einstein 1933.

<sup>6</sup> Paty 1993c.

<sup>7</sup> En 1916: Einstein (1916a et b, 1917a). Cf. Paty (1988), chapitre 3, et (1993b).

formalisme de Hamilton par la relativité restreinte), est sous-tendue par une pensée de la particule au centre de son onde, qui conçoit le dualisme d'une manière déterministe<sup>8</sup>. Quant aux recherches de Schrödinger de 1925-1926, bien qu'elles portent sur un formalisme (celui de Hamilton), elles sont guidées par une pensée de l'onde physique, de la nature ondulatoire de la matière, qui résorbe le dualisme. Cette première phase de la construction comprend, sous l'égide d'une 'intuition physique', le travail dans le formalisme, la dérivation de l'équation d'onde et ses applications, et les premières interprétations<sup>9</sup>. Nous reviendrons plus loin sur la manière dont Schrödinger s'y est trouvé conduit, sur le rapport de son travail formel à l'intuition et à l'interprétation physiques, et sur les problèmes posés par cette dernière en termes d'onde dans l'espace de configuration, qui est un espace abstrait, et non dans l'espace physique réel (il tentera de résoudre ces problèmes à l'aide des notions de densité de courant et de fonction de poids).

A l'inverse, les travaux de Heisenberg, Born, Jordan, Dirac, dans les mêmes années 1925-1926, consistent d'abord en l'établissement d'un formalisme, guidé par le principe de correspondance: on remplace, pour garder les équations de la mécanique, les grandeurs physiques par des matrices, et la physique proprement dite se retrouve seulement dans les résultats (spectre d'énergie, intensité des raies spectrales)<sup>10</sup>. Alors se pose le problème de l'interprétation, c'est-à-dire de la signification physique de ces matrices.

Le second temps de notre scénario est marqué par la question de l'interprétation, posée seulement alors dans le cas du deuxième type d'approche<sup>11</sup>, mais qui s'avère tout aussi radicale pour le premier, en raison des transformations de signification qui affectent les grandeurs à la faveur du travail formel effectué sur elles. L'équivalence, découverte par Schrödinger, de sa mécanique ondulatoire avec la mécanique quantique<sup>12</sup> participe de ces problèmes d'interprétation et de réajustements de sens. Surtout, l'interprétation statistique de Born<sup>13</sup> apporte la connexion pour des systèmes de nombreuses particules entre la prédiction ondulatoire et la prédiction corpusculaire, et le problème de la signification physique de la fonction  $\psi$  représentative d'un système se trouve par là nécessairement posé sur de nouvelles bases. En quelque sorte, la puissance des relations formelles a dépassé l'interprétation physique qui accompagnait leur construction. C'est ici que le drame se noue, le formalisme se conformant moins encore qu'avant à l'interprétation physique directe: Schrödinger se trouve en face d'une difficulté de l'interprétation de la fonction  $\psi$  en termes d'une onde réelle dans l'espace des coordonnées  $q$ : la dispersion du paquet d'onde. Le formalisme qu'il a posé lui

---

<sup>8</sup> De Broglie (1924).

<sup>9</sup> Schrödinger (1925, 1926 a, b, c, d).

<sup>10</sup> Heisenberg (1925), Born, Heisenberg, Jordan (1926).

<sup>11</sup> Notamment Born (1927), Heisenberg (1927), Born et Heisenberg (1928).

<sup>12</sup> Schrödinger (1926e).

<sup>13</sup> Born (1927).

échappe dans sa signification première: il se trouve devant un formalisme - devenu encore plus étranger - qui fonctionne et qu'il doit réinterpréter.

Le temps suivant est celui où la nécessité d'interpréter se fait impérative, en l'absence même de bases sûres pour le faire. L'être étranger - ou le monstre - qu'a engendré le travail formel se voit affecter des significations où aux considérations physiques se mêlent des prises de parti d'autre nature, de philosophie, de propositions sur la connaissance en général. Une conception l'emporte, celle de Copenhague emmenée par Niels Bohr<sup>14</sup>. Ensuite s'effectue, de bon ou mauvais gré, le ralliement aux vues 'orthodoxes' de la complémentarité et de la philosophie de l'observation: de Broglie la rejoint vers 1928, Schrödinger en 1930. Quant à Einstein, il admet toutes les relations de la mécanique quantique (et, en l'occurrence, à partir de 1931, l'universalité des relations d'indétermination), mais non la conception de Copenhague, et s'en tient à l'interprétation statistique de Max Born, voyant dans la fonction  $\psi$  la description d'ensembles de systèmes, non celle de systèmes individuels. Il mènera dès lors, contre l'orthodoxie, un combat de franc-tireur<sup>15</sup>.

L'épisode qui vient ensuite connaît un rebondissement, dû en premier lieu à Einstein, qui donne, vers 1935, le signal d'un soulèvement - coup de main de partisans connu sous le sigle EPR<sup>16</sup> -, ébranlant quelque temps l'assurance et l'emprise de l'interprétation dominante. Bien que celle-ci se réaffirme, plus omniprésente que jamais - la complémentarité asseyant son empire<sup>17</sup> -, elle ne parviendra pas à étouffer les effets durables de cette critique, qui suscite des réinterprétations et, à terme, des clarifications. Schrödinger reconsidère pour sa part le problème de l'interprétation, sous le signe des antinomies de l'"entremêlement", qui relèvent d'une métaphysique du principe de superposition<sup>18</sup>.

Près de vingt ans plus tard, vers 1950, le paysage de la physique théorique a changé, la physique des particules et des champs occupe le devant de la scène. Dans le nouveau contexte théorique que constitue, grâce au succès de l'électrodynamique quantique, la théorie quantique des champs, Schrödinger considère que la seconde quantification jette un jour nouveau sur la question de l'individualité des particules et amène à modifier le problème de l'interprétation<sup>19</sup>. C'est à la même époque que David Bohm ravive la question des variables cachées,

---

<sup>14</sup> Bohr (1928).

<sup>15</sup> Voir Paty (1993b).

<sup>16</sup> L'article d'Einstein, Podolski et Rosen (1935) fait état de corrélations inexplicables si  $\psi$  représente le cas individuel, invoquant alors l'incomplétude et, par voie de conséquence, le caractère statistique de la description (voir aussi Einstein 1948, 1949). L'argument EPR a servi à mettre en évidence la propriété de non-séparabilité locale des systèmes quantiques et, plus tard, suite au théorème de Bell (Bell 1964, 1966), le caractère factuel et non seulement formel de cette propriété: cf. Paty (1986, 1993b).

<sup>17</sup> Bohr (1935, 1948, 1949), Rosenfeld (1962, 1963), *Complémentarité* (1985).

<sup>18</sup> Voir plus loin, ainsi que Paty 1993b.

<sup>19</sup> Schrödinger (1952, 1953).



de l'onde pilote<sup>20</sup>, et que de Broglie reprend son ancienne voie de la double solution<sup>21</sup>, tandis qu'Einstein poursuit imperturbable son chemin<sup>22</sup>. Par ailleurs, le formalisme quantique, assuré de lui-même et satisfait de son succès, se préoccupe de moins en moins d'interprétation: il se la donne à lui-même<sup>23</sup>. (Restent cependant quelques problèmes fondamentaux, comme la théorie quantique de la mesure, et des problèmes philosophiques généraux, 'éternels', sur la réalité et la connaissance que l'on peut en avoir). En cette fin du spectacle, la complémentarité continue mais comme un ornement qui n'est plus vraiment utile et qui s'estompe progressivement avec la disparition de ses promoteurs.

Venons-en maintenant à quelques aspects de la construction de la mécanique ondulatoire, qui mettent en évidence le rôle et l'effet d'entraînement de la relation qu'entretiennent la propriété formelle et l'interprétation physique.

## 2.2. *L'indiscernabilité et la vision ondulatoire*

La première remarque concerne l'interprétation par Schrödinger d'une propriété formelle, qui a peut-être joué un rôle décisif sur son travail en mécanique ondulatoire, à savoir la statistique de Bose-Einstein (février 1925): Schrödinger s'étonne, comme Paul Ehrenfest et Otto Halpern, de ce que, dans son premier article sur la théorie quantique du gaz monoatomique, Einstein, pas plus d'ailleurs que Bose dans le sien<sup>24</sup>, n'ait pas traité les quanta ou les molécules comme des entités statistiquement indépendantes: la distribution ne correspond pas à celle de Boltzmann. Einstein reconnaît que "ces reproches ne sont pas sans fondement", bien que son raisonnement soit correct: il s'efforce d'en éclairer la raison, justifiant le choix par ses conséquences sur les distributions obtenues. Ce qu'il touche ainsi du doigt et désigne, avec le choix d'utiliser la statistique de Bose-Einstein, c'est l'indiscernabilité. Les molécules sont statistiquement dépendantes: ce que "rien ne justifie, sinon le résultat", estime Einstein, qui poursuit: "Avec ce procédé, les molécules apparaissent comme n'étant pas localisées indépendamment les unes des autres; au contraire, une molécule a une certaine propension à être dans la même cellule qu'une autre"<sup>25</sup>.

Autrement dit, l'on a une propriété formelle (un certain traitement inhabituel de la statistique), dont les conséquences théoriques, en accord avec la bonne distribution observée, montrent qu'elle s'impose. Tout le style d'Einstein en

---

<sup>20</sup> Bohm (1952).

<sup>21</sup> De Broglie (1951, 1953).

<sup>22</sup> Cf. Paty (1993d).

<sup>23</sup> Voir, p. ex., Paty (1988, 1992).

<sup>24</sup> Bose (1924a et b), Einstein (1924). Lettre de Schrödinger à Einstein, 5.2.1925. Les lettres se trouvent aux Archives Einstein, Université hébraïque de Jérusalem, et Einstein papers, Université de Boston. Des publications partielles ont été faites, notamment dans Przibram 1963.

<sup>25</sup> Lettre d'Einstein à Schrödinger, 28.2.1925.

matière de quanta est dans ce raisonnement. L'interprétation de la propriété (à la fois formelle et factuelle), c'est la théorie future qui la donnera: pour l'instant, l'on s'éclaire sur elle; elle ne se laisse pas réduire à une explication à notre portée immédiate, parce qu'elle n'aurait alors que la valeur limitée d'un modèle. On ne force pas l'explication: le chemin sera indirect, pour une explication théorique réellement profonde.

L'image de l'empiètement mutuel des molécules dont parlait Einstein, et qui n'était chez lui qu'une façon de parler, semble avoir eu une répercussion immédiate et forte chez Schrödinger, qui la prend à la lettre, comme si elle lui servait de principe d'intelligibilité: elle reviendra d'ailleurs constamment par la suite dans ses considérations sur l'interprétation, tant en 1935 que dans les années cinquante. Mais elle porte immédiatement ses effets sur ses travaux qui établissent la mécanique ondulatoire, dès 1926.

Schrödinger reprend déjà cette question dans son article de décembre 1925, avant-coureur de son travail sur l'équation d'onde<sup>26</sup>. Pour comprendre cette propriété (la future indiscernabilité), il faut, estime-t-il, abandonner l'idée que les molécules du gaz sont des corpuscules rendus indiscernables par une interaction de nature mystérieuse, c'est-à-dire abandonner la représentation corpusculaire. On doit considérer le gaz comme un système d'ondes stationnaires, les molécules étant des états d'excitation d'énergie, et donc dépourvus d'individualité. Le corpuscule n'est qu'une sorte de crête d'écume sur un rayonnement d'onde qui constitue le fond de l'univers. Schrödinger propose ainsi une interprétation physique directe et immédiate de cette propriété qui s'était trouvée introduite de manière formelle, faisant appel, pour cela, à un archétype que l'on peut qualifier de 'vision ondulatoire du monde', qu'il invente en s'appuyant sur le travail de Louis de Broglie, mais qui est relié, comme on va le voir, à ses recherches antérieures.

En quelque sorte, l'entraînement du formalisme est immédiatement 'récupéré' dans le cadre de cette conception générale: il produit une interprétation physique immédiate qui va porter ses fruits, en le conduisant aux travaux qui établissent la mécanique ondulatoire.

### 2. 3. *Le travail sur la mécanique ondulatoire*

Le travail fondateur de Schrödinger sur la mécanique ondulatoire est un travail de nature très formelle, dans lequel il utilise sa connaissance de la physique des milieux continus et des problèmes de valeurs propres (théorie des vibrations)<sup>27</sup>, mais ce travail est sous-tendu par une intuition ondulatoire. Dans le

---

<sup>26</sup> Schrödinger 1925. Il a eu alors connaissance de la thèse de de Broglie, soutenue en décembre 1924 (de Broglie 1924), signalée par Einstein dans son deuxième article sur le gaz parfait monoatomique (Einstein 1925a).

<sup>27</sup> Voir Jammer 1966.

premier mémoire, il propose, à partir d'un principe variationnel, l'équation de Schrödinger indépendante du temps pour des systèmes stationnaires comme une forme quadratique d'une fonction et de ses dérivées premières égale à zéro<sup>28</sup>; dans le second mémoire, il étudie le problème de l'évolution d'un système dans le temps en partant de l'équation de Hamilton, donne la forme générale de l'équation (de Schrödinger)<sup>29</sup>, et l'applique à divers problèmes de physique atomique. Ce n'est qu'à la fin de sa série de mémoires "Quantification et valeurs propres"<sup>30</sup> qu'il est en mesure de proposer une interprétation physique de la fonction  $\psi$ <sup>31</sup>. Jusqu'ici, écrit-il, "la signification de la fonction  $\psi$  dans l'espace de configuration est purement formelle:  $\psi$  est la fonction qui satisfait à l'équation des ondes précédemment décrite, autrement dit, la fonction qui lui sert en quelque sorte d'objet (...). Pour aller plus loin, il faut lui attribuer un sens physique, plus précisément un sens électromagnétique"<sup>32</sup>. C'est que ce sens physique est rapporté aux conditions, physiques, du problème de départ qui était celui de l'émission des ondes électromagnétiques par un système atomique et des propriétés de ces ondes. Cette signification physique est donc exprimée en termes de densité de charge électrique, donnée par l'intégrale, sur l'espace recouvert par le système matériel, de la forme  $\psi\psi^*$ , qui représente "une espèce de *fonction de poids* dans l'espace de configuration du système"<sup>33</sup>. Sous-jacente à cette interprétation, et la guidant, se tient l'image de la "configuration *ondulatoire* du système", constituée par la superposition "de *toutes les configurations* ponctuelles cinématiquement possibles du système", chacune intervenant avec le poids mentionné (pris en ce point). C'est au fond cette notion qui se substitue à la notion de trajectoire, retrouvée à l'approximation macroscopique. En quelque sorte, dans cette manière de voir les choses, la fonction  $\psi$  se voit attribuer une définition abstraite sur un espace de configuration, à laquelle on ajoute une interprétation physique en ce qui concerne son rapport à l'espace réel: "On interprète une distribution déterminée des valeurs de  $\psi$  dans l'espace de configuration comme une distribution continue d'électricité (et de densité de courant électrique) dans l'espace réel", précise-t-il dans la table analytique des matières préparée en novembre 1926 pour l'édition en volume de ses articles<sup>34</sup>.

Schrödinger parle, à ce propos de "changement d'interprétation" de la

<sup>28</sup> Voir plus bas. Pour l'atome d'hydrogène:  $(\nabla\psi)^2 - 2m/K^2 (E + e^2/r) \psi = 0$ .

<sup>29</sup> Voir plus bas.  $(\nabla\psi)^2 + 8\pi^2/\hbar^2 (E - V) \psi = 0$ , la dépendance du temps étant située dans la définition prise pour  $\psi$ :  $\psi(q, t) = \psi(q) \exp(2i(E/\hbar)t)$ . ( $\nabla^2$ ,  $\text{div grad} = \Delta$ , laplacien). L'équation dépendante du temps est écrite dans le quatrième mémoire.

<sup>30</sup> Schrödinger 1926a.

<sup>31</sup> Nommément dans le quatrième mémoire.

<sup>32</sup> Schrödinger 1933, p. xxi.

<sup>33</sup> Schrödinger 1926a, 4<sup>e</sup> mémoire, trad fr. p. 190 (souligné par E.S). L'équation de continuité du courant est:  $\partial r / \partial t + \text{div } S = 0$ , avec la densité de courant  $S = eh / (4 \pi i m) (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*)$ .

<sup>34</sup> Schrödinger 1926d, tr. fr. 1933, p. xxi.

fonction  $\psi$ , par rapport au sens qui paraissait attribué aux "oscillations  $\psi$ ", conçues en termes concrets, comme correspondant "à quelque chose de tout à fait réel": encore qu'il ait été clair auparavant<sup>35</sup> que l'on ne pouvait pas donner de  $\psi$  une interprétation directe dans l'espace à trois dimensions ("malgré la forte suggestion dans ce sens d'un électron unique"<sup>36</sup>). Ce qu'il reste encore de réel à ces 'oscillations  $\psi$ ', ce sont les fluctuations de la densité spatiale électrique: "La fonction  $\psi$  ne doit être rien de plus qu'un élément nous permettant de saisir d'un seul coup d'oeil l'ensemble de ces fluctuations et de les décrire mathématiquement par une seule équation aux dérivées partielles".

Ceci concerne les considérations d'ensemble du travail de Schrödinger sur l'équation d'onde. Revenons un instant sur le premier mémoire de la série "Quantification et valeurs propres", soumis le 27 janvier 1926, qui constitue sa première approche formelle à strictement parler sur le problème étudié. En proposant une brève description de l'aspect analytique de la question, reliant l'équation de Hamilton pour la mécanique et l'équation des ondes qui lui correspond, il adopte un point de vue d'emblée formel, sur un problème simplifié (l'atome d'hydrogène, sans traitement relativiste et sans perturbation), dans le but précisément de mettre en évidence une propriété des règles de quantification (donc, une propriété du formalisme): mais cette propriété formelle pourrait bien, selon lui, toucher "de très près la véritable essence des conditions de quanta". Il s'agit de montrer que, dans l'expression des conditions de quantification, les nombres entiers peuvent être introduits "de la même manière naturelle que le *nombre entier des noeuds* d'une corde vibrante"<sup>37</sup>.

Il lui suffit, pour cela, d'effectuer dans l'équation aux dérivées partielles de Hamilton qui permet d'obtenir les conditions de quantification, un changement de variable parfaitement arbitraire et "incompréhensible", selon ses propres termes<sup>38</sup>, et dont la justification ne s'éclairera que par la suite (dans le second mémoire). Ce changement revient à remplacer une somme de fonctions  $S(q)$  de la variable indépendante (solutions de l'équation  $H(q, \partial S / \partial q) = E$ ,  $S$  étant l'action) par un produit : soit une transformation logarithmique de la fonction  $S$  en une nouvelle fonction  $\psi$ ,  $S = K \log \psi$ ,  $K$  étant une constante). L'équation obtenue, en remplacement de l'équation hamiltonienne initiale (soit  $H(q, K/\psi \cdot \partial \psi / \partial q) = E$ ) peut être écrite comme une forme quadratique de  $\psi$  et de ses dérivées premières égale à zéro. Dès lors, de ce point de vue formel, la recherche des conditions de quanta peut être remplacée par un problème de calcul des variations, à savoir

---

<sup>35</sup> Cela est souligné dans les mémoires précédents, trad. fr., p. 64 et 96 ( $\psi$  est une fonction définie non pas dans l'espace réel mais dans l'espace de configuration, c'est-à-dire l'espace à 3  $n$  dimensions,  $n$  étant le nombre d'éléments du système atomique).

<sup>36</sup> Schrödinger 1926a, 4<sup>e</sup> mémoire, trad fr., p. 192.

<sup>37</sup> Schrödinger 1926a, 1<sup>er</sup> mémoire, trad fr., p. 1-19.

<sup>38</sup> Schrödinger 1926a, 2<sup>e</sup> mémoire, trad fr., p. 20.

trouver les fonctions  $\psi$ <sup>39</sup> qui conduisent à un extremum pour l'intégrale de la forme quadratique. On peut montrer, en spécifiant le hamiltonien<sup>40</sup>, et en appliquant les méthodes connues des calculs de valeurs propres, que la condition requise est satisfaite pour toutes les valeurs positives de l'énergie, mais que, pour les énergies négatives, les solutions constituent une suite discrète. Le spectre discret correspond aux termes de Balmer, et l'accord numérique fixe la constante ( $K = h/2\pi$ ).

Ces conditions obtenues, vient l'interprétation. Schrödinger explique alors de la manière la plus claire qu'il avait eu initialement envie de "rattacher la fonction  $\psi$  à un phénomène de vibration intra-atomique", en lui donnant ainsi une interprétation réelle directe, intuitive, mais qu'il a préféré s'en tenir à "la forme mathématique parfaitement neutre" de la fonction. L'effet de ce choix délibéré aura été de mettre en évidence "l'essentiel de la question", à savoir la possibilité de ramener la condition de la quantification sur les nombres entiers à la propriété d'une fonction spatiale (la fonction  $\psi$ ) de "rester finie, unique et bien déterminée dans tout l'espace de configuration"<sup>41</sup>. Il reste que l'intuition qui attribuait une réalité ondulatoire à la fonction a indéniablement guidé l'utilisation du formalisme. Schrödinger indique avoir été "amené [à ces] considérations en réfléchissant à la distribution spatiale des 'ondes de phase' de Louis de Broglie, qui font apparaître de tels nombres entiers"<sup>42</sup>, à la suite d'ailleurs de son premier travail sur la théorie des gaz d'Einstein, qui faisait intervenir des ondes propres stationnaires<sup>43</sup>. Et il trouve d'ailleurs plus satisfaisant de représenter les transitions atomiques par un échange d'énergie entre des vibrations différentes que par un saut quantique d'un niveau à un autre, puisqu'un tel changement pourrait être représenté dans l'espace et dans le temps, au contraire du second.

Ce n'est qu'à la fin de sa série de mémoires que Schrödinger propose l'interprétation complète que l'on a vue plus haut; cependant, dès le deuxième mémoire<sup>44</sup>, on le voit invoquer une justification de la procédure formelle employée, basée sur l'analogie entre la mécanique et l'optique faite par Hamilton, et qu'avait aussi soulignée de Broglie. Cette analogie confère à la théorie de Hamilton, selon les termes de Schrödinger, un "magnifique vêtement intuitif", que l'on avait malheureusement oublié; c'est sur elle qu'il va en fait se fonder pour asseoir son raisonnement et établir son équation d'onde. Le formalisme (de Hamilton) est ici uti-

---

<sup>39</sup> Possédant évidemment les propriétés d'être "réelles, finies, à détermination unique et deux fois dérivables dans tout l'espace de configuration".

<sup>40</sup> Schrödinger prend comme hamiltonien celui du mouvement d'électrons sur des trajectoires képlériennes figurant les orbites atomiques.

<sup>41</sup> Schrödinger 1926a, 1er mémoire, trad. fr., p. 13.

<sup>42</sup> Nombre entier d'ondes de phase par période de l'électron (de Broglie 1924). Mais à la différence de de Broglie, l'interprétation ondulatoire des formules de Schrödinger concernerait des ondes stationnaires (Schrödinger, *op. cit.*, p. 14).

<sup>43</sup> Schrödinger 1925.

<sup>44</sup> Schrödinger 1926a, 2<sup>ème</sup> mémoire, soumis le 23 février 1926.

lisé à plein, porté par l'intuition de l'analogie optique, qui fournit les relations fécondes dans la ligne esquissée par le premier travail, mais formellement et physiquement justifiées cette fois. La représentation demeure abstraite, mais elle est intuitive: elle est fondée sur l'hypothèse que "la manière correcte de concevoir ou de représenter les phénomènes mécaniques consiste à les rattacher à une propagation d'ondes dans l'espace des  $q$  et non à un mouvement de points représentatifs dans le même espace"<sup>45</sup>. Des considérations de nature épistémologique, faisant intervenir la critique de la notion de point matériel, sont proposées pour étayer cette approche. Schrödinger fait remarquer que "l'étude du mouvement des points représentatifs qui forme l'objet de la mécanique classique n'est qu'un procédé d'approximation et son emploi est tout aussi peu justifié que l'emploi de l'optique géométrique (...), dans le cas des phénomènes lumineux réels". A quoi il ajoute, justifiant l'absence de représentation immédiate (mécanique) au profit de sa formalisation abstraite soutenue par l'intuition physique: "Les équations de la mécanique classique sont tout aussi peu aptes à décrire la structure microscopique des phénomènes mécaniques considérés que l'optique géométrique l'est à expliquer les phénomènes de diffraction". Il faut donc "abandonner les équations fondamentales de la mécanique classique et avoir recours à l'équation des ondes elle-même"<sup>46</sup>.

Il reste que la fonction  $\psi$ , dès qu'elle décrit plus d'une particule, ne peut pas être interprétée comme l'amplitude d'une onde dans l'espace à trois dimensions, mais seulement comme une onde dans l'espace de configuration des variables  $q$ , comme Schrödinger le souligne dans ses mémoires de 1926. Nous allons y revenir.

#### 2. 4. *La propriété d'additivité des valeurs propres*

On sait comment Einstein, ayant lu le second mémoire de "Quantification et valeurs propres", s'étonna de ce que l'équation de Schrödinger qu'il réécrit de mémoire dans une lettre à ce dernier, n'ait pas la propriété d'additivité des niveaux d'énergie, c'est-à-dire que sa solution  $\psi$  n'ait pas la propriété de superposition<sup>47</sup>: étant donné deux solutions pour deux énergies données, la somme des énergies devrait correspondre encore à une solution, qui serait le produit des fonctions précédentes, ce qu'Einstein appelle "théorème d'addition pour deux systèmes indépendants"<sup>48</sup>. Mais il s'était trompé dans sa transcription de la formule de

---

<sup>45</sup> Schrödinger 1926a, 2<sup>ème</sup> mémoire, tr. fr., p. 40.

<sup>46</sup> *Ibid.*

<sup>47</sup> Einstein, lettre à Schrödinger du 16.4.1926.

<sup>48</sup> Einstein, lettre à Schrödinger du 26.4.1926, envoyée avant d'avoir reçu la réponse de Schrödinger à sa missive précédente, et par laquelle il s'apercevait qu'il n'avait pas transcrit la bonne équation.

Schrödinger, qui obéissait en fait à cette propriété<sup>49</sup>. Dans sa réponse à Einstein, Schrödinger indique à ce dernier que c'est grâce à sa remarque qu'il "a pris conscience pour la première fois de cette *"propriété importante de l'appareil formel"*<sup>50</sup>. Il relève d'ailleurs que le raisonnement d'Einstein montre comment il est possible de retrouver l'équation "sur la base d'un couple de conditions fondamentales", à savoir l'additivité des valeurs propres et la factorisation des fonctions d'onde.

Et, de fait, c'est dans le troisième mémoire<sup>51</sup> et dans l'article sur le passage de la micro-mécanique à la mécanique macroscopique<sup>52</sup> que Schrödinger insiste sur l'aspect de superposition impliqué par son équation: "Comme dans le cas analogue de l'équation des cordes vibrantes ou de tout autre système oscillant,  $\psi$  est donné par une superposition de vibrations harmoniques pures (c'est-à-dire de forme sinusoïdale) dont les fréquences sont absolument identiques aux 'fréquences des termes spectraux' du système micromécanique considéré"<sup>53</sup>. Il en donne pour exemple l'oscillateur de Planck, pour lequel la mécanique ondulatoire représente la fonction  $\psi$  comme formée d'une superposition de vibrations propres, ce qui lui permet d'ailleurs de retrouver la mécanique du point matériel comme limite d'une superposition continue de telles ondes<sup>54</sup>. Il croit dès lors pouvoir donner une interprétation de la fonction en termes de paquets d'onde identifiés aux corpuscules. Toutefois, cette conception allait très vite se heurter à des difficultés: à part le cas de l'oscillateur<sup>55</sup>, le paquet d'onde se disperse et ne peut donc être identifié à un corpuscule.

Le principe de superposition renforce (Schrödinger l'exprimera encore en 1952)<sup>56</sup>, la possibilité de penser la continuité, en rejetant la notion de saut.

## 2. 5. L'équivalence des deux mécaniques (mécanique ondulatoire et mécanique des matrices)

La question de l'équivalence des deux mécaniques (mécanique ondulatoire et mécanique des matrices) touche de manière fondamentale à la question du formalisme, puisqu'elle est celle de la transformation ou de la traduction d'un formalisme dans un autre. Dans son article de 1926 où il démontre cette équivalence,

---

<sup>49</sup> Schrödinger, lettre à Einstein, 23.4.1926, in Przibram, p. 26-27. Il s'agit de l'équation :

$\Delta\psi + 8\pi^2/h^2 (E - V) \psi = 0$ , que nous noterons (I).

<sup>50</sup> Schrödinger, lettre à Einstein, 23.4.1926, in Przibram, p. 26-27.

<sup>51</sup> Schrödinger 1926a, troisième mémoire.

<sup>52</sup> Schrödinger 1926c.

<sup>53</sup> Schrödinger 1926b, tr. fr., p. 65.

<sup>54</sup> Schrödinger 1926b, tr. fr., p. 67-70.

<sup>55</sup> Les différences entre ses niveaux successifs d'énergie sont de valeur égale, ce qui en fait un cas très particulier.

<sup>56</sup> Schrödinger 1952.

Schrödinger insiste bien sur la différence entre les deux approches, qui conduisent aux mêmes résultats concernant les cas connus: "tout, point de départ<sup>57</sup>, conception, méthode, appareil mathématique employé, paraît radicalement différent"<sup>58</sup>. L'une correspond à une méthode algébrique, qui fait fond sur la discontinuité, l'autre est au contraire une théorie du continu. Schrödinger se met cependant en devoir de montrer qu'il existe "un lien intime, extrêmement serré", entre les deux, et que "formellement, d'un point de vue purement mathématique, ces deux théories sont identiques". La démonstration se tient sur le terrain du formalisme: on peut faire correspondre une matrice du type de celles de Born et Heisenberg à toute fonction des coordonnées et des moments, et ce indépendamment de l'hamiltonien, c'est-à-dire de manière tout à fait générale<sup>59</sup>. Inversement, les fonctions peuvent être obtenues à partir des matrices. En sorte que "la résolution du problème de conditions aux limites (...) pour l'équation aux dérivées partielles est absolument équivalente à la résolution du problème algébrique de Heisenberg"<sup>60</sup>.

On fera toutefois remarquer que l'équivalence mathématique n'implique pas nécessairement l'équivalence du point de vue physique (la théorie de Lorentz-Poincaré et celle la Relativité restreinte d'Einstein en est un exemple). Dans son article, Schrödinger semble pourtant admettre d'emblée l'équivalence physique, tout en affirmant sa conviction qu'il est difficile, si l'on veut avancer dans la solution des problèmes, "d'éliminer toute image intuitive de la dynamique atomique et de n'opérer qu'avec des notions abstraites telles que probabilités de transitions, niveaux d'énergie, etc."

## 2.6. Problèmes de l'interprétation spatio-temporelle de la nouvelle mécanique

Schrödinger reprend ces problèmes d'interprétation lors des confrontations du Conseil Solvay de 1927<sup>61</sup>. Dans son exposé, il décrit la nouvelle mécanique en prenant le point de vue ondulatoire, d'une interprétation physique directe de la fonction  $\psi$  en termes d'espace et de temps. Il distingue deux aspects, celui de la "mécanique ondulatoire quadridimensionnelle", qui est relative à la description d'un électron relativiste et qui correspond au travail de de Broglie, et celui de la "mécanique ondulatoire polydimensionnelle", qui décrit un système

---

<sup>57</sup> Schrödinger souligne que sa propre approche du problème des quanta ne doit rien à celle de Heisenberg, et se base au contraire sur les idées de de Broglie et sur certaines remarques d'Einstein.

<sup>58</sup> Schrödinger 1926 c, tr.fr., p. 71-99.

<sup>59</sup> Pour obtenir les règles de calcul de Heisenberg, il suffit, comme on sait, de substituer, dans l'expression d'une fonction des  $q_i$  et des  $p_i$ , chaque  $p_i$  par l'opérateur linéaire  $\partial/\partial q_i$ , etc.

<sup>60</sup> Sur les discussions de l'époque relatives à la confrontation des deux mécaniques, voir, p. ex., Jammer 1966, p. 271-280.

<sup>61</sup> Schrödinger 1927.



quelconque de points dans l'espace par l'espace de configuration  $q$  (à  $3n$  dimensions), lequel correspond à un artifice mathématique. Cette "mécanique ondulatoire polydimensionnelle" vise, elle aussi, à décrire un événement dans l'espace et dans le temps, mais on ne constate pas vraiment de conciliation possible entre les deux points de vue. Dès qu'un système dépasse le cas d'un électron unique, il ne peut être traité que par la mécanique ondulatoire polydimensionnelle: c'est "cette manière de voir qui fournit la solution mathématique des problèmes posés par la mécanique des matrices". La mécanique quadridimensionnelle est "plus belle en elle-même"; mais l'autre permet de mettre en lumière les difficultés qui lui sont inhérentes (ce que Schrödinger se propose de montrer)<sup>62</sup>.

Au lieu que la mécanique classique recherche toutes les fonctions  $q_n(t)$ , la mécanique ondulatoire polydimensionnelle considère les  $q_n$  comme indépendants et cherche une seule fonction  $\psi(q_n, t)$ . Le changement de rôle des  $q_n$  est "le point saillant de la théorie". Schrödinger expose comment on trouve l'équation et ses solutions dans le cas stationnaire, et discute alors du rôle de la variable temps, pour les systèmes isolés ou en interaction. Pour ce qui est du système isolé, si l'on s'en tient à considérer les divers états stationnaires et les probabilités de saut d'un état à un autre (c'est-à-dire, de fait, à l'interprétation minimale du formalisme), le temps ne joue aucun rôle<sup>63</sup>, et les états sont rapportés les uns aux autres par une simple règle de probabilité. Mais, en réalité, le temps figure implicitement dans l'équation d'onde<sup>64</sup> par l'expression de  $\psi$  comme une onde plane<sup>65</sup>. En posant  $E = h\nu$ , l'équation obtenue admet comme solution les fonctions  $\psi_k \approx \exp(2i\pi\nu_k t)$ , ainsi que toute combinaison linéaire de ces fonctions. En sorte que "les états stationnaires de Bohr correspondent alors aux vibrations propres du système" (constituées par les éléments de la superposition).

Schrödinger se pose alors la question de la signification de la fonction d'onde solution de l'équation: "Que signifie maintenant la fonction  $\psi$ , c'est-à-dire *quel est en réalité l'aspect du système décrit par cette fonction dans un espace à trois dimensions ?*" On admet qu'elle décrit les processus d'un grand nombre de systèmes: Schrödinger en propose une image, non plus en termes d'un système classique de points matériels, mais comme l'existence "de quelque chose qui remplit continuellement tout l'espace", et dont une "photographie instantanée" serait obtenue en laissant l'obturateur ouvert et "en faisant passer le système classique par toutes ses configurations, en laissant l'image dans l'espace  $q$  séjourner dans chaque élément de volume  $d\tau$  pendant un temps qui est proportionnel à la valeur instantanée de  $\psi\psi^*$ ". La charge de chacun de ces points est distribuée d'une façon

---

<sup>62</sup> Schrödinger 1927, p. 185-186

<sup>63</sup> Selon la remarque de N. Campbell en 1926, cité par Schrödinger (1927), p. 189.

<sup>64</sup> Equation (I), donnée à la note 49.

<sup>65</sup>  $\psi \approx \exp(2i\pi\nu t)$ .

continue à travers l'espace, etc<sup>66</sup>.

Il considère alors le passage à la théorie quadrimensionnelle, relative à l'électron unique, et aboutit à la conclusion que "la pure théorie du champ ne suffit pas; elle doit être complétée par ceci, qu'on entreprend une espèce d'*individualisation* des densités électriques provenant des diverses charges ponctuelles du modèle classique, mais dans cette individualisation chaque 'individu' peut être distribué sur tout l'espace, de façon que les individus s'entrepénètrent"<sup>67</sup>. On retrouve ainsi l'image qui l'avait frappé en 1925.

Dans la discussion qui suit l'exposé de Schrödinger, Heisenberg et d'autres font valoir que la compréhension dans l'espace à trois dimensions à laquelle on revient en fin de compte (les coefficients peuvent être interprétés dans cet espace) n'est pas meilleure qu'avec les matrices. Schrödinger plaide cependant pour la nécessité de parvenir à une interprétation physique pour aller plus avant. Autrement dit, si l'on veut faire avancer la théorie, on ne peut se contenter d'un formalisme aveugle: on doit être l'interpréter physiquement et, pour lui, cette interprétation physique passe par une vision ondulatoire, qui conditionne l'intelligibilité. Mais cette interprétation se heurte à de nouvelles difficultés, comme Lorentz, puis Heisenberg et d'autres le soulignaient: la dispersion du paquet d'onde empêche son identification à un corpuscule<sup>68</sup>. Les nouveaux phénomènes observés sur la diffusion des électrons, en particulier dans leur diffraction par des cristaux et dans leurs collisions, ne pouvaient se comprendre s'il y avait dispersion du paquet d'onde. Et encore, comme le faisait remarquer Louis de Broglie au Conseil Solvay de 1927, la dimension du paquet d'onde est plus grande que la longueur d'onde (ou au minimum égale à elle), ce qui donnerait une dimension des corpuscules différente de celle obtenue par ailleurs<sup>69</sup>. D'autres difficultés s'ajouteront par la suite<sup>70</sup>.

### 3. LA GEOMETRIE DE L'ESPACE-TEMPS ET L'UNIVERS PHYSIQUE

Avant d'aborder la question de l'interprétation après la réorganisation, je voudrais évoquer un autre domaine à propos duquel se pose aussi la question du rapport entre le formalisme et l'interprétation physique en vue de la construction théorique dans la pensée de Schrödinger: c'est celui de la théorie de l'espace-temps de la Relativité générale. On verra, malgré la différence avec les problèmes de la mécanique quantique, comment sa pensée de l'interprétation physique directe et

---

<sup>66</sup> Schrödinger 1927, p. 192. Schrödinger tente de préciser de manière plus claire son image, qui est mal comprise dans le débat (Electrons et photons 1928, p. 207).

<sup>67</sup> Schrödinger 1927, p. 199.

<sup>68</sup> H. A. Lorentz, lettre à Schrödinger du 27.5.1926 in Przibram 1963. Voir aussi Heisenberg (1927). Cf. Jammer (1966), p. 283.

<sup>69</sup> In *Electrons et photons* 1927.

<sup>70</sup> Voir plus loin.

immédiatement intuitive est présente même dans son utilisation la plus élaborée de la formalisation mathématique.

### 3.1. *Le point de vue du formalisme et ses raisons physiques*

Dans son ouvrage de 1950 sur la théorie de la Relativité générale, ou plus exactement sur *La Structure de l'espace-temps*<sup>71</sup>, Schrödinger adopte un point de vue formel, comme il est usuel dans ce domaine. Cependant son approche du problème diffère des autres présentations antérieures ou contemporaines sur plus d'un point, et cette originalité est révélatrice de sa conception du rapport entre le physique et le formel. Nous allons tenter de caractériser cette dernière à ce propos, ce qui pourra fournir la matière d'un rapprochement avec ce qui précède. Son abord du problème, du formel au physique, comporte plusieurs temps et peut se résumer de la manière suivante.

Schrödinger *reformule* la théorie de la Relativité générale de façon à lui donner, du point de vue mathématique - géométrique - une plus grande généralité. Ce parti-pris - ou cette stratégie - est dû à la leçon des recherches postérieures au travail d'Einstein de 1915, à savoir les tentatives effectuées par Weyl, Eddington, Einstein lui-même - il est curieux que Schrödinger ne mentionne pas Cartan -, pour étendre la géométrisation des champs d'interaction au-delà du seul champ de gravitation<sup>72</sup>. On sait, en 1950, qu'il existe d'autres champs que les deux champs classiques connus (gravitationnel et électromagnétique): la physique des particules et des champs est en plein développement, et la théorie quantique des champs a déjà connu de grands succès, mais aussi des difficultés - sur lesquelles Schrödinger a souvent insisté. La géométrie de l'espace-temps, généralisée au-delà du seul champ de gravitation, lui paraît une voie possible, qu'il a d'ailleurs déjà lui-même explorée. Sous le rapport de l'espace-temps, l'interaction gravitationnelle pure se distingue des autres interactions en ce qu'elle est la plus simple, puisque l'on peut y supposer le tenseur d'énergie-impulsion localisé en un point matériel. Les autres interactions ont une structure différente. Il est possible de penser - telle est son hypothèse - "développer les conceptions géométriques de l'espace-temps pour obtenir les lois de champ du tenseur de matière d'une manière naturelle".

Pour développer la théorie dans cette direction, il faut aller au-delà de la géométrisation opérée par la Relativité générale. Cette dernière est constituée sur deux principes dont le statut est très différent, à savoir: d'une part, le principe de covariance générale pour des transformations ponctuelles arbitraires (principe fondamental, de formulation plus simple que toute autre que l'on peut se

---

<sup>71</sup> Schrödinger 1950.

<sup>72</sup> Voir notamment Eddington (1920, 1923), Weyl (1918 a et b), Cartan (1930, 1931a et b), Einstein, Cartan (1979) et les nombreuses tentatives d'Einstein qui ont occupé les dernières décennies de sa vie. Cf. Paty (1993a), chap. 5.

proposer);

d'autre part, le caractère de connexion métrique du continuum, c'est-à-dire qu'une forme quadratique des coordonnées,  $ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k$  est invariante sous ces transformations. Cependant la Relativité générale repose sur des conceptions qui ne sont pas particulières à la connexion métrique, telles que la différenciation invariante, le tenseur de Riemann-Christoffel, la courbure, les principes de variation, etc. Il existe une connexion plus fondamentale et générale que la connexion métrique, qui est la connexion affine: c'est elle qui définit une différenciation répondant à l'invariance générale. La connexion affine peut ensuite être spécifiée de telle sorte qu'elle engendre une métrique. De nombreuses tentatives de généralisation de la théorie de la Relativité générale sont basées sur ce type de connexion plus générale (et déjà celle de Weyl, en 1918<sup>73</sup>).

Le livre de Schrödinger ABORDE AINSI LE FORMALISME DE L'ESPACE-TEMPS, TOUJOURS CONÇU COMME UN CONTINUUM, SOUS SON ASPECT LE PLUS GENERAL POSSIBLE, MAIS POUR DES RAISONS PRECISES qui tiennent directement au caractère physique du problème posé. D'UN AUTRE COTE, L'EXPOSE DU FORMALISME S'ACCOMPAGNERA, LE MOMENT VENU, DE CONSIDERATIONS INTERPRETATIVES SUR LA SIGNIFICATION PHYSIQUE DE LA CONSTRUCTION OBTENUE. La géométrie du continuum d'espace-temps y est abordée en trois étapes. La première suppose seulement l'invariance (ou covariance) générale, et l'on y traite des variétés sans connexion, qui supposent simplement des vecteurs et des tenseurs. Mais ce formalisme ne suffit pas pour obtenir l'invariance dans le passage d'un tenseur d'un point à un autre. D'où le deuxième temps, où l'on considère des *variétés à connexions affines*, qui correspond à l'obtention de dérivées invariantes, et s'attache aux notions de transport parallèle, de tenseur de courbure, de géodésique, lesquelles, appliquées au problème de la Relativité générale, constituent "l'hypothèse géométrique générale sur la gravitation". On aboutit ainsi à la représentation du champ de gravitation par une connexion affine. La troisième étape est consacrée à la considération des *variétés à connexions métriques*, qui correspond à une spécification des connexions affines par l'ajout d'"une autre entité géométrique d'importance fondamentale, c'est-à-dire une métrique riemannienne" (c'est de là, en fait, qu'Einstein était parti). Les raisons de cette spécification sont encore de nature formelle (et elles caractérisent un entraînement par le formalisme). Telles que Schrödinger les invoque, elles sont les suivantes: i) la connexion affine donne lieu à un invariant  $ds$  le long de chaque géodésique, ce qui suggère une comparaison de tels éléments  $ds$  pour des géodésiques différentes; ii) il existe un invariant  $ds$  lié à une géodésique donnée: il n'est autre que celui de la Relativité restreinte:  $ds^2 = dt^2 - dx^2$ . On le généralise en  $ds^2 = g_{ik} dx_i . dx_k$ , et l'on est amené à examiner la métrique  $g_{ik}$ , ce qui conduit, moyennant certains choix, aux équations de la Relativité générale.

On se trouve donc amené, après le traitement formel, à la Relativité

---

<sup>73</sup> Weyl (1918b).

générale, qui apparaît ainsi, du point de vue des connexions affines, comme un cas très particulier, "susceptible de généralisation dans de nombreuses directions"<sup>74</sup>.

### 3.2. *Un aspect symptomatique du point de vue de l'interprétation physique sur la relation entre Relativité restreinte et Relativité générale*

Ayant construit un continuum métrique à quatre dimensions, avec connexion affine et connexion métrique, l'on se préoccupe maintenant, toujours suivant l'exposé de Schrödinger, d'en faire un "modèle du monde physique réel"<sup>75</sup>. Il faut donc interpréter les éléments de ligne d'univers  $ds$  entre deux points infiniment voisins.

La première interprétation qui se propose est celle de la Relativité restreinte: ceci, pour des raisons qui sont en même temps formelles et physiques ou, plus précisément, en raison d'une propriété formelle qui présente un intérêt directement physique. Cette propriété est la suivante: pour une transformation linéaire des éléments différentiels  $dx_k$  (à coefficients constants et de déterminant non nul), on peut toujours - c'est un théorème d'algèbre bien connu - ramener la forme générale de la métrique,  $ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k$ <sup>76</sup>, à une somme algébrique de carrés:

$ds^2 = \Sigma (\text{de } 1 \text{ à } 4) (\pm) dx'_k{}^2$ . On peut trouver une transformation de coordonnées qui produise cette forme en un point quelconque de l'espace à quatre dimensions. Et c'est une propriété des formes quadratiques que le nombre de signes (-) de la forme  $ds^2$  est déterminé de manière invariable par les coefficients  $g_{ik}$  initiaux. La question de la signification physique des grandeurs géométriques de la Relativité restreinte se voit donc posée de manière naturelle en termes de l'invariance des lois par les transformations qui conservent ce  $ds^2$ , de l'équivalence des systèmes d'inertie définis à partir de ces coordonnées, de la signification de la notion de point dans l'espace et dans le temps (les deux étant pensés en relation), de temps propre, de simultanéité, de longueur au repos (entendue comme le fait que la longueur maximum est celle dans le système du corps au repos), etc.

Schrödinger souligne l'importance de l'aspect mathématique de la formulation de ces notions, difficiles à faire comprendre au non mathématicien, et qui ont suscité tant de paradoxes: "le mathématicien est préparé à des ruptures avec les idées coutumières, tout simplement parce que les quatre coordonnées sont en jeu dans la transformation"<sup>77</sup>. Au centre de la théorie de la Relativité restreinte

---

<sup>74</sup> Schrödinger 1950, p. 69.

<sup>75</sup> Schrödinger 1950, p. 75.

<sup>76</sup> Avec la convention usuelle de sommation sur les indices répétés.

<sup>77</sup> Schrödinger 1950, p. 76.

se tient en effet l'invariant  $s^2$  des transformations de Lorentz:  $s^2 = -x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 + x_4^2$ .

C'est alors qu'il se met en devoir, selon ses propres termes, d'"utiliser les notions de la Relativité spéciale ou restreinte pour interpréter physiquement le schème mathématique de la Relativité générale" <sup>78</sup>. Ce qui l'amène à énoncer un point de vue qui peut paraître curieux de prime abord: "On ne saurait trop insister sur le fait que la Relativité générale n'est pas du tout - d'un certain point de vue [celui qu'on vient de décrire] - ce que son nom semble indiquer; car elle est, de ce point de vue, non une généralisation, mais plutôt une restriction de la théorie soit-disant restreinte"<sup>79</sup>.

La Relativité générale restreint, en effet, la validité de la Relativité restreinte (ou spéciale) au voisinage d'un point d'univers quelconque, même si, dans la pratique, cette région 'infinitésimale' est très grande (à champ de gravitation faible et constant, par exemple le système solaire pour le périhélie de Mercure). L'explication, telle que Schrödinger la propose, de ce retournement est la suivante: "Une transformation générale des coordonnées ( $x'_k = 4$  fonctions arbitraires des  $x_k$ ) revient à une transformation linéaire des  $dx_k$  en chaque point d'univers, et donc (...) à une transformation de Lorentz des  $dx_k$  en chaque point variant de manière continue d'un point à un autre et pouvant être considérée comme constante dans une petite région". Soit  $dx'_k = (\partial x'_k / \partial x_l) dx_k$ . C'est une transformation plus générale qu'une transformation de Lorentz. En effet, cette dernière étant une rotation dans l'espace des coordonnées à quatre dimensions, elle comporte six paramètres libres, au lieu de seize: soit dix degrés de liberté supplémentaires pour la transformation générale par rapport à la Relativité restreinte.

La raison en est que l'on considère, à partir du point d'univers choisi, les transformations de coordonnées pour tous les points d'univers; et que l'invariant  $ds^2$  n'a plus la forme  $ds^2 = -dx_1^2 - dx_2^2 - dx_3^2 + dx_4^2$  pour chaque système de référence, mais la forme générale  $ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k$ , les dix fonctions  $g_{ik}$  changeant avec le système de référence.

Cette explication fait encore comprendre, et cette fois en rapport à la question de l'interprétation, pourquoi Schrödinger parle de "restriction" de la validité de la Relativité restreinte: c'est une restriction à l'interprétation directe des coordonnées générales à quatre dimensions. "A partir de cette forme générale, nous ne pouvons donner, pas même dans cette petite région, *et ni même par rapport au référentiel que nous utilisons*, la distance spatiale et l'intervalle de temps entre deux événements ponctuels. *Les coordonnées générales d'univers ne*

---

<sup>78</sup> Schrödinger 1950, p. 82

<sup>79</sup> *Ibid.*

*sont pas aptes à une interprétation directe*"<sup>80</sup>.

La perspective est inverse de celle d'Einstein dans sa construction de la Relativité générale, exposée par exemple dans son article de 1916<sup>81</sup>, montrant comment la généralisation du principe de relativité aux mouvements quelconques demande d'abandonner la signification directe des coordonnées telles qu'elle était donnée dans la mécanique classique et dans la Relativité restreinte<sup>82</sup>. On peut attribuer la raison de cette inversion à ce que, dans la perspective de Schrödinger, l'on est parti du formalisme établi pour l'interpréter physiquement, et cette interprétation physique est pensée d'abord de manière directe (signification directe des coordonnées d'espace et de temps, des distances et des intervalles de temps). Schrödinger indique expressément que "pour l'interprétation [de la Relativité générale], nous devons nous ramener à un système de la Relativité restreinte". (Il indique, cela étant, un aspect par lequel la Relativité générale est plus générale que la Relativité restreinte: elle peut, par une transformation de coordonnées, supprimer le champ de gravitation local, de la même façon que la Relativité restreinte, par transformation de Lorentz, rendait équivalents le mouvement et le repos). Que la signification physique de la Relativité générale soit rapportée nécessairement à la Relativité restreinte, parce que les grandeurs de cette dernière sont susceptibles d'une interprétation directe, cela relève d'une conception de l'intelligibilité qui consonne avec ce que nous avons vu à propos des systèmes quantiques: le continuum spatiotemporel est supposé directement intelligible. De plus, la terminologie employée rappelle celle qui a cours en physique quantique: la "limitation" de la Relativité restreinte apportée par la Relativité générale rappelle la limitation des grandeurs classiques (coordonnées d'espace et quantités de mouvement) imposée par la mécanique quantique: pour Schrödinger - comme d'ailleurs pour Bohr ou même pour Heisenberg -, les contenus physiques des propositions théoriques sont naturellement rapportés aux grandeurs spatiotemporelles classiques, supposées intuitives. Les théories qui mettent en cause la signification physique directe de ces grandeurs, comme la mécanique quantique et la Relativité générale le font, chacune très différemment de son côté, sont d'abord pensées comme limitant les contenus possibles de connaissance conçus dans ces termes.

On voit ici comment la question de l'interprétation physique du formalisme est toujours guidée, chez Schrödinger, par une intuition spatiotemporelle préoccupée de transcrire directement le continuum. Le continuum est d'ailleurs très vraisemblablement le substrat de sa vision ondulatoire du monde, ce qui n'est sans doute pas indifférent à sa préoccupation d'une

---

<sup>80</sup> "From this general form we cannot even within this small region, *and not even with respect to the frame we are using*, tell the spatial distance and the time-interval between two point-events. *General world-coordinates are not fit for being interpreted directly*" (Schrödinger 1950, p. 84, souligné par E.S.)

<sup>81</sup> Einstein (1916c). Voir aussi (1917b).

<sup>82</sup> Cf. Paty (1989b).

géométrisation spatiotemporelle des propriétés de la matière. Faisons encore une remarque, à propos de l'interprétation qu'il conviendra, selon lui, d'attribuer aux diverses grandeurs qui entrent dans les théories proposées plus générales que la gravitation: "On doit même, je crois", écrit-il, "être préparés à trouver qu'il n'existe en général aucune séparation nette entre les divers champs; qu'ils se fondent l'un dans l'autre de quelque manière qu'il est difficile de prévoir"<sup>83</sup>. Cette idée, qui présente quelque analogie de formulation avec ses intuitions sur "l'empiètement" à propos des fonctions d'onde (et qui est sa manière de formuler l'exigence d'unification des champs), lui paraît confortée par les développements de la théorie quantique des champs, comme nous allons le voir en terminant.

#### 4. REINTERPRETATION DU FORMALISME DE LA MECANIQUE QUANTIQUE

##### 4.1. *L'interprétation d'Einstein et celle de Schrödinger*

Nous avons vu comment Schrödinger résolvait la question de la dualité onde-corpuscule en faveur d'un monisme ondulatoire, à la différence des interprétations d'autres fondateurs de la théorie quantique, qui soit maintenaient ensemble les notions d'onde *et* de corpuscule (Bohr les conciliant par la complémentarité, de Broglie les raccordant par l'image de la particule guidée par son onde), soit les alternaient - onde *ou* corpuscule - dans une représentation statistique, correspondant à une théorie complète pour Max Born, incomplète pour Einstein. (Il serait peut-être plus exact de dire que Born rejetait toute dualité fondamentale en donnant une interprétation statistique en termes de particules, dont il associait la présence à la fonction d'onde, influencé par l'idée de 'champ fantôme', '*Gespensterfeld*', proposée par Einstein, au début des années vingt, à propos de la relation entre les ondes électromagnétiques et les quanta de lumière. Mais dans cette interprétation, ce sont les amplitudes, et non les probabilités, qui s'additionnent, à la différence des propriétés corpusculaires ordinaires: la probabilité devient physique sous la forme d'ondes de probabilité. Quant à Einstein, il soulignait plutôt l'insuffisance des notions classiques de corpuscule et d'onde, appelées à être dépassées dans une théorie plus fondamentale<sup>84</sup>). En faveur de l'interprétation purement ondulatoire des phénomènes atomiques, Schrödinger démontra en 1927<sup>85</sup> que l'effet Compton, expliqué initialement par la conservation de l'énergie-impulsion d'un photon et d'un électron, peut l'être aussi bien comme un effet d'interférence entre des ondes. Mais il avait aussi bien montré antérieurement que l'effet Doppler, considéré comme une manifestation de

---

<sup>83</sup> Schrödinger 1950, p. 116.

<sup>84</sup> Cf. Paty 1993b.

<sup>85</sup> Schrödinger 1927.



la nature ondulatoire de la lumière, s'explique également en termes de particule lumineuse émise par une source en mouvement. Comme le rappelle Alfred Landé<sup>86</sup>, ce résultat plaide en faveur de l'équivalence formelle des deux modes de description, ondulatoire et corpusculaire, pour ce qui est des résultats statistiques d'ensemble. Toutefois, rejetant la dualité, Schrödinger s'en tient aux ondes de matière, dont l'évolution est déterminée par l'équation différentielle dépendante du temps (équation de Schrödinger), où les crêtes d'onde jouent le rôle de particules. Telle est sa première interprétation: les particules sont des illusions, produites par des crêtes d'onde dans un *substratum* continu. Mais cette "interprétation ondulatoire unitaire"<sup>87</sup>, apparut non tenable sous cette forme première, comme on l'a vu. Max Born souligna, au Conseil Solvay 1927, l'existence d'une autre solution que celle d'onde réelle ou de trajectoire corpusculaire, en termes d'espace polydimensionnel, en concluant "qu'une description complète des processus qui s'effectuent dans un système formé de plusieurs molécules n'est possible que dans un espace à un grand nombre de dimensions"<sup>88</sup>.

En face de cet état de choses, Schrödinger s'est par la suite efforcé de maintenir une conception ondulatoire, sans dualisme, tout en l'adaptant en s'inspirant en partie de la conception de Copenhague sur le rapport entre l'observation et la réalité. La comparaison de sa position avec celle d'Einstein permet de mieux comprendre quelle est exactement sa nature: cette comparaison nous est rendue possible par leurs articles respectifs de 1935<sup>89</sup>, leurs échanges de lettres de cette période, à propos de l'argument EPR et des mésaventures du fameux chat, et leurs interventions ultérieures sur les problèmes épistémologiques de la physique quantique<sup>90</sup>.

Einstein revendique la possibilité, pour une théorie complète, de représenter des systèmes individuels, et s'élève contre l'argument de principe opposé à cette exigence au nom du brouillage que produirait l'opération de mesure sur les valeurs exactes des grandeurs (conjuguées). L'argument EPR est dirigé contre cette explication: si l'on considère, indique-t-il en substance, des grandeurs supposées décrire des systèmes individuels, on constate qu'il est possible de les penser dans leur réalité, indépendamment du fait qu'on les mesure ou non (grandeurs conservées pour des sous-systèmes corrélés), et cependant la mécanique quantique ne permet pas de les décrire: c'est donc que cette dernière est incomplète. L'article EPR insiste sur la définition de ces grandeurs, et Einstein resta insatisfait de sa rédaction<sup>91</sup>. Le fond de l'argument est, pour lui, le suivant: même si de telles grandeurs ne constituent pas le dernier mot de la description, et

---

<sup>86</sup> Landé 1960.

<sup>87</sup> Comme la qualifie Landé (1960), p. xiii.

<sup>88</sup> Max Born, intervention, in *Electrons et photons* 1928, p. 253.

<sup>89</sup> Einstein, Podolski, Rosen (1935), Schrödinger (1935a et b).

<sup>90</sup> Voir, pour une discussion plus détaillée, Paty 1993b.

<sup>91</sup> Il exprima cette insatisfaction dans une lettre à Schrödinger du 19.6.1935.

quelle que soit cette dernière, la difficulté fondamentale à prétendre la théorie complète réside en ceci que le choix de déterminer l'état d'un système  $I$  par un ensemble donné de valeurs propres résultant d'une mesure détermine en même temps l'état décrivant un autre système,  $II$ , indépendant du premier, et sans intervention d'un processus de mesure. En d'autres termes, il n'y a pas biunivocité entre l'état d'un système et la fonction qui le décrit (puisque celle-ci peut être multiple, suivant les déterminations du premier système, objet de mesure). Pour formuler le problème de cette façon, il invoque un "principe de séparabilité" (entre les systèmes  $I$  et  $II$  qui ont pu constituer au temps initial un seul et même système ensuite dissocié), qui ne fait pas partie des propositions de la mécanique quantique, mais qui lui paraît nécessaire pour caractériser des systèmes réels. Le caractère statistique résulte de l'incomplétude quant à la description des états réels (individuels) par la fonction  $\psi$ .

Pour Schrödinger, le problème n'a pas la même signification, en premier lieu parce que son interprétation de la fonction d'onde est différente, ensuite parce que le principe de séparation d'Einstein exclut, précisément, sa conception, enfin parce qu'il espère la solution dans la direction de la théorie quantique des champs (du moins renvoie-t-il le problème au fait que l'on traite de la mécanique quantique non-relativiste, où la vitesse de la lumière  $c$  est considérée comme finie. Mais Einstein veut s'en tenir à la seule "mécanique quantique exempte de contradictions", non relativiste, l'autre posant d'autres sortes de difficultés, et ne fait pas sienne cette fuite en avant<sup>92</sup>). Einstein exprime leur désaccord en constatant, malgré le réalisme qu'ils ont en commun<sup>93</sup> (pour Schrödinger, la fonction  $\psi$  a bien pour but "la représentation du réel"): "Et pourtant nous nous opposons de la manière la plus aiguë qui soit sur le chemin à suivre"<sup>94</sup>.

Si, pour Schrödinger, la fonction  $\psi$  représente l'état réel du système, c'est dans un sens qui n'est plus aussi direct que dans ses premières interprétations, et qui allie dans un certain éclectisme philosophique le réalisme et l'idéalisme, la caractérisation réelle de  $\psi$  et le caractère subjectif de son contenu physique: la mécanique quantique est complète, et l'état ne se réalise que parce qu'on l'observe. Ce qu'Einstein qualifie d'interprétation "spiritiste" ou "mystique", et à quoi il oppose la considération sur la réduction par la mesure impliquée par l'argument EPR, dont il donne une illustration par l'expérience de pensée du baril de poudre (analogue au cas d'une désintégration radioactive, qu'il a souvent évoquée par ailleurs). Le baril se trouve, au temps zéro, en équilibre chimique instable, et son état au temps  $t$  est donné par l'équation de Schrödinger. C'est une conséquence du principe de superposition que, quel que soit l'état (bien défini) dont on est parti, l'état du baril pourra être considéré au bout d'un temps donné comme une

<sup>92</sup> Einstein, lettre à Schrödinger du 19.6.1935.

<sup>93</sup> Einstein écrira, en 1950, à Schrödinger (lettre du 22.12.1950), que, parmi les physiciens contemporains, il (Schrödinger) était le seul, avec von Laüe, à voir que l'on ne peut se dispenser de l'hypothèse de réalité.

<sup>94</sup> Einstein, lettre à Schrödinger du 8.8.1935.

superposition des états explosé et non explosé. Ce qui, macroscopiquement, n'a pas de sens, et implique donc à ses yeux que la description est seulement de nature statistique<sup>95</sup>, d'où il résulte que la fonction  $\psi$  ne peut être une description d'un "état de choses réel".

Schrödinger publia très peu de temps après son expérience de pensée, sans doute inspirée par le baril de poudre d'Einstein, sur le paradoxe du chat, voué à être tué à l'acide cyanhydrique libéré par l'amplification d'une désintégration radioactive<sup>96</sup>, et dont l'état se trouve, avant toute réduction due à l'observation qui le trouvera dans l'un ou l'autre des états, dans une superposition de chat mort et de chat vivant. Il s'agit, pour Schrödinger, d'une situation - caractéristique de la physique quantique - telle que "à une indétermination initialement limitée au domaine atomique est associée une indétermination macroscopique qu'il est possible de lever par l'observation directe". Ce qui, estime-t-il, "nous empêche d'accepter de manière naïve qu'un modèle flou puisse correspondre à la réalité"<sup>97</sup>. La réduction par la mesure étant acceptée comme principe, elle oblige de rompre avec le réalisme naïf en interdisant de remplacer la chose réelle par la fonction  $\psi$ , "parce que l'observation est un processus naturel comme n'importe quel autre et ne doit pas entraîner *per se* de rupture dans le cours régulier de la nature". Ayant abandonné le réalisme naïf, nous nous trouvons devant un matériau mathématique bien établi "pour déterminer le lieu où la nature a fixé la frontière de l'inconnaissabilité, c'est-à-dire quelle est la meilleure connaissance possible d'un objet"<sup>98</sup>. Schrödinger fait sienne cette proposition de la doctrine officielle que la fonction  $\psi$  est un catalogue de prévisions, c'est-à-dire un instrument qui nous permet de prédire la probabilité des valeurs mesurées; il considère que la détermination de  $\psi$  s'effectue par la mesure et doit être maximale (c'est la mesure qui détermine la réalité: si on la répète, on retrouve le même résultat); que, d'un autre côté, la réduction par la mesure pour un système décrit par une fonction  $\psi$  entraîne une déperdition de connaissance (en raison du caractère maximal de  $\psi$  avant la mesure) et, comme "notre connaissance ne saurait se perdre", il s'ensuit que l'objet change de manière discontinue (il en résulte, en particulier, que nous devons "appréhender de manière objective l'interaction entre l'objet mesuré et l'instrument de mesure"<sup>99</sup>). Ceci définit une nouvelle sorte de réalité<sup>100</sup>. Si Schrödinger s'oppose à la complémentarité, qu'il voit comme un "refuge dans l'épistémologie", et à la définition, qu'elle accompagne, de ce qui est réel par son observation et la connaissance que l'on en

---

<sup>95</sup> *Ibid.*

<sup>96</sup> Schrödinger 1935a.

<sup>97</sup> Schrödinger 1935a, p. 106.

<sup>98</sup> *Ibid.*, p. 108.

<sup>99</sup> *Ibid.*, p. 117.

<sup>100</sup> *Ibid.*, p. 115.

a<sup>101</sup>, il considère lui-même en même temps que, comme la réalité dépasse les modèles que l'on s'en fait, le seul fondement de la pensée en physique réside dans les résultats des mesures qui peuvent être effectuées sur elle.

L'expérience de pensée de type EPR sur des sous-systèmes corrélés<sup>102</sup> lui permet d'illustrer sa conception du rapport de la réalité à l'observation. Comme le "catalogue général" qui constitue la description comporte des énoncés conditionnels traduisant la corrélation des sous-systèmes, "il ne peut être maximal pour chacun des sous-systèmes": il y a, entre ces derniers, un "entremêlement de prévisions", et l'objet ne peut être extrait de cet entremêlement que par un acte mental, au moment de la prise de connaissance du résultat de mesure. Mais ce n'est pas à ce moment, ni non plus à cause de l'acte mental, que  $\psi$  effectue un saut. La fonction  $\psi$  de l'objet a été perdue, mais elle avait cessé d'être auparavant, "et ce qui n'existe pas ne saurait évoluer". La fonction  $\psi$  est reconstituée par la mesure, extraite de la connaissance entremêlée par un acte de perception, sans qu'il s'agisse là d'une interaction physique<sup>103</sup>. Schrödinger précise d'ailleurs plus loin que, lorsque deux systèmes interagissent, leurs fonctions  $\psi$  respectives n'interagissent pas, mais cessent d'exister, et une fonction  $\psi$  globale (produit des deux  $\psi$  individuels) les remplace. Quand, ensuite, les systèmes se séparent, la fonction  $\psi$  globale ne peut se séparer en facteurs pour chacun des deux systèmes: "La meilleure connaissance possible pour un système n'implique pas celle de chacune de ses parties, et c'est cela qui nous hante". La connaissance maximale du système global demeure; si l'on reconstitue le catalogue de l'un des systèmes, celui-ci n'est plus conditionné par l'autre, l'entremêlement est complètement résolu et il ne peut y avoir de catalogue complet pour l'autre.

Telle est, selon Schrödinger, la solution de ce qu'il appelle les "antinomies de l'entremêlement"<sup>104</sup>. Si nous sommes fondés à y voir une sorte de représentation physico-métaphysique du principe de superposition, on peut en même temps y déceler une représentation intuitive à sa manière de la non-séparabilité, nommément désignée par Einstein (qui la refusait)<sup>105</sup>.

La différence, au niveau physique, entre l'interprétation d'Einstein et celle de Schrödinger sur l'expérience de pensée EPR, tient pour l'essentiel à leur manière de considérer le rôle de la fonction  $\psi$  et la conclusion à tirer de la non-factorisabilité des fonctions d'onde de deux sous-systèmes. Einstein exprime cette dernière en termes d'interaction ("L'état réel de  $II$  ne peut pas dépendre de la mesure que j'entreprends sur  $I$ "), et lui oppose son principe de séparation (*Trennungsprinzip*), qui deviendra le principe de séparabilité<sup>106</sup>, et qui constitue à

<sup>101</sup> Tout comme il s'oppose aux variables cachées (*ibid.*, p. 103-104).

<sup>102</sup> Schrödinger (1935a), p. 117 et suiv.

<sup>103</sup> *Ibid.*, p. 123.

<sup>104</sup> *Ibid.*, p. 138.

<sup>105</sup> Voir, en particulier, Einstein (1948, 1949). Cf. Paty (1993b).

<sup>106</sup> Einstein, lettre à Schrödinger du 19.6.1935, Einstein (1948).

ses yeux la parade à la position qui nie la réalité (Bohr) aussi bien qu'à celle qui la subordonne à la connaissance du sujet (Schrödinger). Au contraire d'Einstein, Schrödinger tient que les deux déterminations indépendantes de la fonction  $\psi$  du second système par les mesures (complètes) du premier doivent être identiques, puisqu'elles correspondent à des catalogues maximaux<sup>107</sup>. Mais il remarque que la théorie ne garantit pas cette identité, et parfois la contredit: de fait il constate, comme Einstein, qu'elles sont en général, suivant la théorie, différentes.

## 2. CONTRE LES SAUTS QUANTIQUES ET L'INTERPRETATION PROBABILISTE

Schrödinger a maintenu par la suite sa conception ondulatoire de la fonction  $\psi$ : bien qu'elle ne donne pas lieu à une interprétation directe<sup>108</sup>, elle entraîne à ses yeux des conséquences d'importance fondamentale pour notre conception des processus physiques. La mécanique ondulatoire explique les phénomènes atomiques comme des phénomènes vibratoires, de manière analogue à la théorie de l'élasticité; les transitions, les interactions, ne sont autres que des phénomènes de résonance. Il rejette la notion de sauts quantiques, qu'il juge aussi ingénieux et inutilement compliqués que la théorie des épicycles de l'astronomie ancienne: "Les sauts quantiques sont la contrepartie moderne en physique théorique [de la théorie des épicycles]"<sup>109</sup>. On doit penser fréquences atomiques et non paquets d'énergie: "L'énergie macroscopique est un concept de quantité (*Quantitätsgrösse*). L'énergie microscopique signifiant  $h\nu$  est un 'concept de qualité' ou 'd'intensité' (*Intensitätsgrösse*)". L'énergie n'a pas de sens au niveau microphysique, et l'interaction microscopique est un phénomène continu. Le principe de superposition autorise à penser à tous les états intermédiaires, mais l'équation d'onde de la mécanique quantique nous oblige à admettre que l'interaction entre deux systèmes physiques microscopiques est contrôlée par une loi de résonance, à savoir:  $\nu_1 - \nu_1' = \nu_2' - \nu_2$ . On doit en outre considérer que des systèmes qui interagissent constituent un seul système, de sorte que l'on a:  $\nu_1 + \nu_2 = \nu_1' + \nu_2'$ . Tous ces arguments lui paraissent de nature à emporter la conviction: "N'importe comment les ondes sont là, et l'on n'est pas en peine de le prouver"<sup>110</sup>.

Ainsi, la fonction  $\psi$  est-elle bien description de quelque chose, bien que celui-ci ne soit pas assignable directement, ni à des faits observables, ni à la

<sup>107</sup> Schrödinger 1935, p. 125-126.

<sup>108</sup> Voir, par ailleurs, la méditation sur les propriétés du continu mathématique (Schrödinger 1950, tr. fr., p. 49-59), qui étaye la conscience des difficultés d'une représentation du monde physique par le continu. L'idée de discontinuité est née des difficultés du continu. L'idée d'atome en provient (*ibid.*, p. 73-77).

<sup>109</sup> Schrödinger 1952.

<sup>110</sup> "The waves are there anyhow, and we are not at a loss to prove it" (*ibid.*).

nature: elle ne nous donne que des informations sur les faits<sup>111</sup>. (Relevons par ailleurs que Schrödinger n'accorde pas aux probabilités en usage en physique quantique - liées à la fonction d'onde - une acception spécifique, différente de la conception commune: "une assertion probabiliste présuppose la pleine réalisation de son sujet", c'est-à-dire que la probabilité porte sur un événement qui est ou qui n'est pas)<sup>112</sup>. L'onde est son image privilégiée, même si elle n'opère que par analogie et suggestion pour l'intuition. D'une manière générale, Schrödinger plaide pour l'utilisation de modèles imagés, susceptibles de faire tenir ensemble les relations mathématiques et de les faire comprendre. L'évolution de la physique, dans les années qui vont, en gros, de 1946 à sa mort en 1953, le confirme en tout cas dans le bien-fondé de son 'image ondulatoire du monde'. Cette période voit le développement de la physique des particules élémentaires et de la théorie quantique des champs, auquel il emprunte de nouveaux arguments pour étayer la suprématie de la représentation ondulatoire sur la représentation corpusculaire et l'idée que les corpuscules sont des états d'excitation de quelque chose comme un continuum ondulatoire. On ne peut comprendre, à ses yeux, des phénomènes comme la diffraction des rayons X ou des ondes de matière sans admettre que les fonctions d'onde "décrivent quelque chose de réel", réel signifiant ici "que l'onde agit simultanément à travers toute la région qu'elle recouvre, et non ici ou là"<sup>113</sup>. C'est, précise-t-il, "toute la différence entre "et-et et ou-ou" (le "et-et" désigne les propriétés de l'onde, et le "ou-ou" l'interprétation probabiliste). Il estime que les objections qui invoquaient la dispersion ou le ralentissement par le milieu traversé des ondes réunies en paquet ne sont plus aussi embarrassantes qu'autrefois, en particulier parce que nous savons que les particules se transforment les unes dans les autres, et invoque une explication pour le maintien de la cohésion du paquet d'onde.

Si la diffraction de particules par une double fente manifeste une des lacunes de notre description des événements observables (on ne sait pas par quelle fente la particule est passée), elle constitue en même "un exemple caractéristique du défaut d'individualité des particules"<sup>114</sup>. Schrödinger s'appuie sur l'idée de seconde quantification pour étayer cette idée, comme il l'avait déjà suggéré en 1935<sup>115</sup>: ce que l'on croit être la trajectoire d'une particule donnée n'en est pas vraiment une, puisque rien ne nous prouve que c'est la même particule qui est observée aux endroits et aux instants différents, l'identité des particules étant une notion ambiguë, voire dénuée de sens: "Il est hors de doute que la question de l'identité, de l'individualité, n'a vraiment et réellement aucune signification"<sup>116</sup>.

---

<sup>111</sup> *Ibid.*, p. 60-61

<sup>112</sup> Schrödinger, lettre à Einstein, 18.11.1950.

<sup>113</sup> Schrödinger 1952.

<sup>114</sup> Schrödinger 1950, p. 67.

<sup>115</sup> Schrödinger 1946, ed. 1962, p. 49.

<sup>116</sup> Schrödinger 1950, tr. fr., p. 37-40.

Cette considération, suscitée par les notions de création et d'annihilation de particules en vigueur dans la théorie quantique des champs, est hypostasiée en une doctrine métaphysique de "la forme remplaçant la substance comme concept fondamental". En effet, malgré l'absence d'individualité, il existe une permanence dans la particule, qui est celle de la forme ou configuration (*Gestalt*); ce que l'on appelle identité n'est que l'impression causée en nous par cette forme, par exemple par la structure d'un assemblage, où le matériau, s'il existe, ne joue qu'un rôle secondaire. La configuration n'est pas configuration ou forme de quelque chose, et les particules élémentaires ne sont peut-être, pour ainsi dire, que "pure configuration": la critique par Schrödinger de la substance et du réalisme 'chosiste' aboutit ainsi à un 'réalisme de pure image', c'est-à-dire à un idéalisme radical<sup>117</sup>.

## REFERENCES

- BELL, John S. (1964). On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox, *Physics* 1, 1964, 195-200. Repris in Bell 1987, p. 14-21.
- (1966). On the problem of hidden variables in quantum mechanics, *Review of Modern Physics* 38, 1966, 447-452. Repris in Bell 1987, p. 1-13.
- (1987). *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
- BOHM, David (1952). A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden variables', *Physical Review* 85, 1952, 166-179, 180-193.
- BOHR, Niels (1928). Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik, *Naturwissenschaften* 16, 1928, 245-257. Texte anglais: The quantum postulate and the recent development of atomic theory, *Nature* 121, 1928, 580-590 ; également in trad. angl. (1934, ed. 1961, p. 52-91) de Bohr 1929. Trad. fr., Le postulat des quanta et le nouveau développement de l'atomistique", in *Electrons et photons* 1928, p. 215-247.
- (1929). *Atomteori og Naturbeskrivelse*, L. Bogtrykkeri, Kobenhavn, 1929. Trad. all., *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, Springer-Verlag, Berlin, 1931. Trad. angl., *Atomic theory and the description of nature*, Cambridge University Press, Cambridge, 1934; re-ed., 1961.
- (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?, *Physical Review* 48, 1935, 696-702.
- (1948). On the notions of causality and complementarity, *Dialectica* 2, 1948, 312-319.
- (1949). Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics, in Schilpp 1949, p. 199-241.
- BORN, Max, HEISENBERG, Werner et JORDAN, Pascual (1926 b). Zur Quantenmechanik II,

---

<sup>117</sup> On notera par ailleurs que, dans ses considérations sur le thème de la relation sujet-objet, Schrödinger ne souscrit pas à la thèse, défendue par Bohr et Heisenberg, de l'évanouissement de la frontière entre les deux, estimant que la signification philosophique profonde et véritable de la relation entre le sujet et l'objet ne peut dépendre de résultats quantitatifs de mesures physique ou chimiques. Au mieux, à la thèse ancienne de leur interdépendance dans l'observation (action de l'objet sur le sujet), la mécanique quantique ajoute la réciprocité: mais le terme sujet est inapproprié (il est préférable, pour Schrödinger, de le réserver pour désigner l'esprit qui observe).

- Zeitschrift für Physik* 35, 1926, 557-615. Egalement in Born 1963, vol. 2, p. 155-213.
- (1927). Quantenmechanik und Statistik, *Naturwissenschaftlich* 15, 1927, 238-242.
  - et HEISENBERG, Werner (1928). La mécanique des quanta, in *Electrons et photons* 1928, p. 143-183.
- BOSE, Satyendranath N. (1924a). Planck's Gesetz und Lichtquantenhypothese, *Zeitschrift für Physik* 26, 1924, 178-181 (trad. par A. Einstein); texte angl. in Theimer, H. and Ram, B., The beginning of quantum statistics, *American Journal of Physics* 44, 1976, 1056-1057.
- (1924 b). Wärmegleichgewicht im Strahlungsfeld bei Anwesenheit von Materie, *Zeitschrift für Physik* 27, 1924, 384-390.
- BROGLIE, Louis de (1924). *Recherches sur la théorie des quanta*, Thèse, Paris, 1924; *Annales de physique*, 10 ème série, 3, 1925, 22-128; ré-éd., Masson, Paris, 1963.
- (1951). Remarques sur la théorie de l'onde-pilote, *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences* (Paris) 233, 1951, 641-644; repris dans de Broglie 1953, p. 65-69.
  - (1953). *La physique quantique restera-t-elle indéterministe ?*, Gauthier-Villars, Paris, 1953.
- CARTAN, Elie (1930). Notice historique sur la notion de parallélisme absolu, *Mathematische Annalen* 102, 1930, 698-706. Egalement: in Cartan 1952-1955, vol. 3, 2, p. 1121-1129.
- (1931a). Le parallélisme absolu et la théorie unitaire du champ, *Revue de métaphysique et de morale* 38, 1931, 13-28. Egalement: *Actualités scientifiques et industrielles* 34, Hermann, Paris, 1932. Egalement: in Cartan 1952-1955, vol. 3, 2, p. 1167-1185.
  - (1931b). Sur la théorie des systèmes en involution et ses applications à la relativité, *Bulletin de la Société mathématique de France* 59, 1931, 88-118. Egalement in Cartan 1952-1955, vol. 2, 2, p. 1199-1229.
  - (1952-1955). *Oeuvres complètes*, 3 tomes en 5 volumes, Gauthier-Villars, Paris, 1952-1955.
- COMPLEMENTARITE (1985). *Revue d'histoire des sciences* 38, 1985, n° 3-4, n° spécial *La Complémentarité*.
- EDDINGTON, Sir Arthur Stanley (1920). *Space, time and gravitation*, Cambridge University Press, Cambridge, 1920.
- (1923). *The mathematical theory of relativity*, Cambridge University Press, Cambridge, 1923; 2nd ed, 1924.
- EINSTEIN, Albert (1916a). Strahlung-emission und -absorption nach der Quantentheorie, *Deutsche physikalische Gesellschaft, Verhandlungen*, XVIII, 1916, 318-323.
- (1916 b). Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physikalische Gesellschaft Mitteilungen* (Zürich), 1916, 47-62.
  - (1916c). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annalen der Physik*, ser. 4, XLIX, 1916, 769-822. Trad. fr. par M. Solovine, Les fondements de la théorie de la relativité générale, in A.E., *Les fondements de la théorie de la relativité générale*, Hermann, Paris, 1933, p. 7-71.
  - (1917a). Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physikalische Zeitschrift* XVIII, 1917, 121-128. Trad. angl., On the quantum theory of radiation, in van der Waerden 1967, p. 63-78. Trad. fr. par M. Dembno-Tchaïkowsky et D. Fargue, Sur la théorie quantique du rayonnement, *Annales de la Fondation Louis de Broglie* 4, 1979, 65-83. Autre trad. fr., Théorie quantique du rayonnement, in Einstein 1989 a, p. 134-147.
  - (1917b). *Ueber die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Gemeinverständlich, Vieweg, Braunschweig, 1917. Tr. fr. par J. Rouvière, *La théorie de la relativité restreinte et généralisée mise à la portée de tous*, Gauthier-Villars, Paris, 1921; 2 ème éd., 1964. Autre tr. fr. par Maurice Solovine, *La théorie de la relativité restreinte et générale*, Gauthier-Villars, Paris, 1954 [trad. sur la 14 ème éd. allemande, avec les appendices; rééd. 1969].
- , LORENTZ, Hendryk Antoon, MINKOWSKI, Hermann, WEYL, Hermann (1923). *The principle of relativity*, with notes by Arnold Sommerfeld, transl. by W. Perrett and G.B. Jeffery, Methuen, London, 1923. Ré-éd., Dover, New York, 1952.



- (1924). Quantentheorie des einatomigen idealen Gases, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte* 22, 1924, 261-267. Trad. fr., Théorie quantique du gaz parfait monoatomique, in Einstein 1989 a, p. 172-179.
- (1925a). Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1925, p. 3-14. Trad. fr., Théorie quantique du gaz parfait monoatomique. Deuxième mémoire, *Annales de la Fondation Louis de Broglie* 7, 1982, 129-145. Autre trad. fr. (partielle), Théorie quantique du gaz parfait. Deuxième mémoire, in Einstein 1989 a, p. 180-192.
- (1925b). Quantentheorie des idealen Gases, *Preussische Akademie Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1925, p. 18-25.
- (1933). *On the method of theoretical physics*, The Herbert Spencer lecture, Oxford, June 10, 1933; repris in Einstein 1954, p. 265-270. Original allemand, Zur Methodik der theoretischen Physik, in Einstein 1934, ed. 1960, p. 113-119.
- (1934). *Mein Weltbild*, Querido, Amsterdam, 1934. Ré-édition [modif. et augm. sous la dir. de Carl Seelig, Europa-Verlages, Zurich, 1953; Ullstein Bücher, West-Berlin, 1960 Trad. fr., par le Colonel Cros, *Comment je vois le monde*, Flammarion, Paris, 1934; nouvelle trad. par R. Henrion, Flammarion, Paris, 1969.
- , PODOLSKY, Boris et ROSEN, Nathan (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?, *Physical Review*, ser. 2, XLVII, 1935, 777-780. Trad. fr., Peut-on considérer que la mécanique quantique donne de la réalité physique une description complète ?, in Einstein 1989 a, p. 224-230.
- (1948). Quantenmechanik und Wirklichkeit, *Dialectica* II, 1948, 35-39. Trad. fr., Mécanique quantique et réalité, in trad. en fr. de Einstein, Born (1969 a), p. 184-188. Autre trad. fr., in Einstein (1989), p. 244-249.
- (1949). Reply to criticism. Remarks concerning the essays brought together in this cooperative volume, in Schilpp 1949, p. 663-693. [trad. angl. par P. A. Schilpp, de l'original allemand: Bemerkungen zu den in diesen bande Vereinigten Arbeiten, in édition de Schilpp 1949 en allemand, p. 493-511.
- (1954). *Ideas and Opinions*, trad. anglaise par S. Bergmann, Crown, New-York, 1954. Ré-éd. Laurel, New-York, 1981.
- et BORN, Max (1969). *Albert Einstein/Max Born Briefwechsel 1916-1955*, Nymphenburger Verlagshandlung GmbH, München, 1969. Trad. fr. par P. Leccia, *Correspondance 1916-1955, commentée par Max Born*, Seuil, Paris, 1972.
- et CARTAN, Elie (1979). *Letters on absolute parallelism, 1929-1932*, éd. par Robert Debever. Texte original et trad. angl. par J. Leroy et J. Ritter, Princeton University Press et Académie royale de Belgique, Princeton, 1979.
- (1989). *Oeuvres choisies, vol. 1: Mécanique statistique et physique quantique*. Textes choisis et présentés par F. Balibar, O. Darrigol et B. Jech. Trad. de l'allemand, Seuil/Ed. du CNRS, Paris, 1989.
- ELECTRONS ET PHOTONS* (1928). *Electrons et photons. Rapports et discussions du cinquième Conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927 sous les auspices de l'Institut international de physique Solvay*, Gauthier-Villars, Paris, 1928.
- HEISENBERG, Werner Heisenberg, Werner (1925). Ueber quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen, *Zeitschrift für Physik* 33, 1925, 879-893. Trad. angl. "Quantumtheoretical reinterpretation of kinematic and mechanical relations", in van der Waerden (1967), p. 262-276.
- (1927). Ueber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, *Zeitschrift für Physik*, 43, 1927, 172-198.
- (1955). The development of the interpretation of the quantum theory, in Pauli, Rosenfeld, Weisskopf (1955), p. 12-29.

- HOWARD, Don A. (1985). Einstein on locality and separability, *Studies in the History and Philosophy of Science* XVI, 1985, 171-201.
- JAMMER, Max (1966). *The conceptual development of quantum mechanics*, Mc Graw-Hill, New York, 1966.
- (1974). *The philosophy of quantum mechanics*, Wiley and sons, New York, 1974.
- KRAGH, Helge (1982). "Erwin Schrödinger and the wave equation: the crucial phase", *Centaurus* 26, 1982, 154-197.
- LANDE, Alfred (1955). *Foundations of quantum theory, a study in continuity and symmetry*, Yale and Oxford University Presses, Yale/Oxford 1955.
- (1960). *From dualism to unity in quantum physics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1960.
- PATY, Michel 1985. Einstein et la complémentarité au sens de Bohr : du retrait dans le tumulte aux arguments d'incomplétude, *Revue d'histoire des sciences* 38, 1985, n° 3-4, 325-351.
- (1986). La non-séparabilité locale et l'objet de la théorie physique, *Fundamenta Scientiae* 7, 1986, 47-87.
- (1988a). *La matière dérobée*, Archives contemporaines, Paris, 1988.
- (1988b). Sur la notion de complétude d'une théorie physique, in Fleury, N., Joffily, S., Martins Simões, J.A. and Troper, A. (eds.), *Leite Lopes Festschrift. A pioneer physicist in the third world*, World scientific publishers, Singapore, 1988, p. 143-164.
- (1989a). L'inséparabilité et la mesure des systèmes quantiques, in Jacob, A. (dir.) *Encyclopédie philosophique universelle*, volume 1: Jacob, A. (dir.), *L'Univers philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1989, p. 1172-1177. Repris dans M.P., *L'analyse critique des sciences*, L'Harmattan, Paris, chap. 12, p. 164-175.
- (1989b). Interprétation et construction dans le rapport des mathématiques à la physique, *Fundamenta scientiae* 10, 1989, 35-55.
- (1992). L'endoréférence d'une science formalisée de la nature, in Dilworth, C. (ed.), *Intelligibility in science*, Rodopi, Amsterdam, 1992, p. 73-110.
- (1993a). *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris (sous presse).
- (1993b). *Einstein, les quanta et le réel (critique et construction théorique)*, à paraître.
- (1993c). Le caractère historique de l'adéquation des mathématiques à la physique, in *Rencontre franco-espagnole sur l'histoire des mathématiques*, Madrid, 18-19 novembre 1991, à paraître.
- (1993d). Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie sur les 'variables cachées' de la mécanique quantique, *La Pensée* (à paraître).
- PAULI, Wolfgang ; ROSENFELD, Léon and WEISSKOPF, Victor F. (eds., 1955). *Niels Bohr and the development of physics. Essays dedicated to Niels Bohr on the occasion of his seventieth birthday*, Pergamon press, London, 1955.
- PRZIBRAM, K. (ed., 1963). *Schrödinger, Planck, Einstein, Lorentz: Briefe an Wellenmechanik*, Springer, Wien, 1963. Trad. angl., *Letters on wave mechanics: Schrödinger, Planck, Einstein, Lorentz*, Philosophical Library, New York, 1967.
- RAMAN, V.V. (1969). Why was it Schrödinger who developed de Broglie's ideas?, *Historical Studies in the physical sciences* 1, 1969, 291-314.
- ROSENFELD, Léon (1962). Le conflit épistémologique entre Einstein et Bohr, *Revue de métaphysique et de morale* 67, 1962, 147-151. Trad. angl., The epistemological conflict between Einstein and Bohr, *Zeitschrift für physik* 171, 1963, 242-245 ; également in Rosenfeld 1979, p. 517-521.
- (1963). Niels Bohr's contribution to epistemology, *Physics Today*, 16, oct. 1963. Egalement in Rosenfeld 1979, p. 522-535.
- (1979). *Selected papers*, edited by Robert S. Cohen and John Stachel, Reidel, Dordrecht, 1979.

SCHILPP, Paul Arthur (ed., 1949). *Albert Einstein, philosopher-scientist*, The library of living philosophers, Open Court, La Salle (Ill.), 1949. Ré-ed., *ibid.* et Cambridge University Press, London. [3<sup>e</sup> ème éd., 1970]. Trad. en all., *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1955.

SCHRÖDINGER, Erwin (1925). Zur Einsteinschen Gastheorie, *Physikalische Zeitschrift* 27, 1926, 95-101. Egalement in Schrödinger 1984, vol. 1, p. 358-364. [Reçu le 15.12.1925]. Trad. fr., Sur la théorie des gaz d'Einstein, *Annales de la Fondation Louis de Broglie* 7, 1982, 147-164.

- (1926 a). Quantizierung als Eigenwertproblem, I,II,IV, *Annalen der Physik* 79, 1926, 361-376 [reçu le 27.1.1926]; 489-527 [reçu le 23.2.1926]; 80, 1926, 437-490 [reçu le 10.3.1926]; 81, 1926, 109-139 [reçu le 21.6.1926]. Egalement in Schrödinger 1984, vol. 3, p. 82-97; 97-136; 166-219; 220-250. Trad. fr., Quantification et valeurs propres I, II, III, IV, in Schrödinger 1933, p. 1-19; 20-64; 101-160; 161-196.

- (1926 b). Der Stetige Uebergang von der Mikro- zur Makromechanik, *Die Naturwissenschaften* 28, 1926, 664-666. Egalement in Schrödinger 1984, vol. 3, p. 137-142. Trad. fr., Le passage continu de la micro-mécanique à la mécanique macroscopique, in Schrödinger 1933, p. 65-70.

- (1926 c). Ueber das Verhältnis der Heisenberg-Born- Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen, *Annalen der Physik* 79, 1926, 734-756 [reçu le 18.3.1926]. Egalement in Schrödinger 1984, vol. 3, p. 143-165. Trad. fr., Sur les rapports qui existent entre la mécanique quantique de Heisenberg-Born-Jordan et la mienne, in Schrödinger 1933, p. 71-99.

- (1926 d). *Abhandlungen zur Wellenmechanik*, Barth, Leipzig, 1926; 2<sup>e</sup>me éd. 1928.

- (1927). La mécanique des ondes [Rapport au Conseil Solvay de 1927], in *Electrons et photons* 1928, p. 185-213. Egalement in Schrödinger 1984, vol. 3, p. 302-323.

- (1933). *Mémoires sur la mécanique ondulatoire*, [Trad. de Schrödinger 1926 d, par A. Proca, avec des notes inédites de E. Schrödinger], Alcan, Paris, 1933.

- (1935 a). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, *Die Naturwissenschaften* 23, 1935, 807-812 ; 824-828 ; 844-849. Egalement in Schrödinger 1984, vol. 3, p. 484-501. Trad. angl. dans Zurek, Wheeler 1983. Trad. fr. par F. de Jouvenel, A. Bitbol-Hespériès, et M. Bitbol, La situation actuelle en mécanique quantique, in Schrödinger 1992, p. 89-185.

- (1935 b). Discussion of probability relations between separated systems, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 32, 1936. Egalement in Schrödinger 1984, vol. 3, p. 424-432.

- (1936). Probability relations between separated systems, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 32, 1936. Egalement in Schrödinger 1984, vol. 3, p. 433-452.

- (1946). *Statistical thermodynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1946. 2nd ed, enlarged, 1962

- (1950). *Space-time structure*, Cambridge University Press, Cambridge, 1950; repr. with corrections, 1960; 1988.

- (1951). *Science and humanism. Physics in our time*, Cambridge University Press, Cambridge, 1951. Trad. fr. par J. Ladrière, *Science et humanisme. La physique de notre temps*, Desclée de Brouwer, Paris, 1954. Ré-éd. in Schrödinger 1992, p. 19-87.

- (1952). "Are there quantum jumps?", *The British Journal for the Philosophy of Science* 3, 1952 (n° 10). Reprod. in *Annales de la Fondation Louis de Broglie* 1, 1975, (n°) 4, 218-232; 2, 1977 (n° 1), 52-61.

- (1953). The meaning of wave-mechanics- La signification de la mécanique ondulatoire, in de Broglie 1953, p. 16-32.

- (1961). *Mein Weltansicht*, Paul Zsolnag Verlag, Hamburg/Wien, 1961. Trad. fr. par C. Rinova et B. Chabot, *Ma conception du monde*, Mercure de France-Le Mail, Paris, 1982.

- (1984). *Gesammelte Abhandlungen. Collected papers*, 4 vols., Verlag der Oesterreichischen Akademie der Wissenschaften/ Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wien, 1984. [Vol. 1: *Beiträge zur statistischen Mechanik-Contributions to statistical mechanics*; 2: *Beiträge zur Feldtheorie-*

*Contributions to field theory*; vol. 3: *Beiträge zur Quantentheorie-Contributions to quantum theory*; vol. 4: *Allgemein wissenschaftliche und populäre Aufsätze-General scientific and popular papers.*]

WAERDEN, B. L. van der (1967). *Sources of quantum mechanics*, North Holland, Amsterdam, 1967.

WEYL, Hermann (1918 a). *Raum, Zeit, Materie*. [1ère édition, cours professé à l'Ecole Polytechnique fédérale de Zurich en 1917.] 3ème édition remaniée, 1919. 4ème édition, augmentée, 1921. Trad. fr. sur la quatrième édition allemande, par Gustave Juvet et Robert Leroy, *Temps, espace, matière. Leçons sur la théorie de la relativité générale*, Blanchard, Paris, 1922. Nouveau tirage augmenté de commentaires par Georges Bouligand, Blanchard, Paris, 1958; 1979.

- (1918 b). *Gravitation und Elektrizität, Sitzungberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaft*, 1918. Trad. angl., "Gravitation and electricity", in Einstein *et al.* 1923, ed. 1952, p. 199-216.

ZUREK, W. H. and WHEELER, J. A. (eds., 1983). *Quantum theory and measurement*, Princeton University Press, Princeton, 1983.